

논문 2007-44IE-3-4

공간광변조기를 이용한 위상다중화 체적 홀로그램에 관한 연구

(A Study on Phase-Multiplexed Volume Hologram using Spatial Light Modulator)

조 중 덕*, 김 규 태**

(Jong dug Jo and Kyu Tae Kim)

요 약

각다중화 방법과 함께 널리 사용되고 있는 위상다중화의 방법으로 PSC(pseudo random code)를 제안하고 기존의 위상부호인 PRC(pure random code), ERC(equivalent random code), HAM(Hadamard matrix)등과 성능을 비교분석 하였다. 프로그램적으로 32×32의 동일한 화소수로 각 위상부호를 발생시키고, 실제 광시스템에서 공간광변조기의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%의 에러율을 갖는 위상값을 의도적으로 부가함으로써 네 가지 형태의 위상부호들을 구한 다음 각각의 자기상관 및 상호상관 성분을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 위상부호간의 영상누화 및 신호대 잡음비를 비교, 분석하였다. 그 결과 32×32의 화소수에 대해서는 PSC의 상호상관에 의한 평균값이 0.067로 다른 형태의 위상부호들의 신호대 잡음비와 비교하여 가장 작게 나타났으며, 임의의 어드레스비에 의한 순간적인 영상누화를 나타내는 표준편차값도 PSC가 0.0113으로 가장 작게 나타났다. 또한, 어드레스의 빔크기에 해당되는 화소수를 32×32, 64×64, 128×128, 256×256 등과 같이 변화시키면서 화소수에 따른 영향을 분석하였다.

Abstract

For an effective phase multiplexing in a volume holographic system, four types of phase code, pseudo random code(PSC), Hadamard matrix(HAM), pure random code(PRC), equivalent random code(ERC), used as reference beams 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. Crosstalks and SNRs(signal-to-ratio) are comparatively analyzed for these phase codes by the auto-correlation and cross-correlation. PSC has the lowest cross-correlation mean value of 0.067 among four types of phase code, which means the SNR of the pseudo random phase code is higher than other phase codes. Also, the standard deviation of the pseudo random phase code indicating the degree of recalled data degradation is the lowest value of 0.0113. In order to analyze the affect by variation of pixel size, simulation is carried out by same method for the case of 32×32, 64×64, 128×128, 256×256 address beams.

Keywords : hologram, phase-multiplexing, crosstalk

I. 서 론

초기의 위상다중화 체적 홀로그램 방법은 각다중화 체적 홀로그램의 기록된 영상을 복원할 때 복원영상의

신호대 잡음비 (SNR:signal-to-noise ratio)를 개선하기 위한 부수적인 역할로 주로 사용되었다. 그러나 체적 홀로그램의 다중화 방법 중에서 가장 널리 이용되는 각다중화 방법은 기준빔의 입사각을 제어하기 위한 기계적, 전자적인 장치들의 불안정성이나 복잡성 등으로 인해 많은 문제점을 초래함으로써 최근 기준빔에 대한 입사각 제어가 필요 없고 비교적 간단한 구조로 고속의 랜덤 액세스가 가능한 위상다중화 방법이 많이 연구되고 있다.^[1-4]

위상다중화 체적 홀로그램은 1968년 J. LaMacchia와 D. White^[5]에 의해 포토그래픽 감광매체에 ground

* 정회원, 서일대학 정보전자학과
(Department of Information Electronics, Seoil College)

** 정회원, (주)마크애니
(Company of Markany)

※ 본 논문은 2006년 서일대학 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

접수일자: 2007년5월4일, 수정완료일: 2007년9월4일

glass plate를 이용하여 동일한 영역에 여러 개의 점광원을 기록한 것을 시작으로 최근에는 비교적 정확한 위상변조가 가능한 위상형 공간광변조기(PSLM: Phase type spatial light modulator)^[6]를 이용한 다양한 위상다중화 방법들이 연구되었다. 1977년 T. Krile와 Morozov^[7]에 의해 각선택도를 갖지 않은 평면홀로그래프에서 기준빔을 부호화하여 crosstalk을 최소화할 수 있는 조건을 발표한 이후, 1979년 T. Krile^[8]는 여러 개의 이진 위상부호 마스크를 기준빔으로 사용한 실험을 수행하였고, 1982년에는 E. Kral^[9]이 랜덤확산기(random diffuser)를 이용하여 체적 홀로그래프를 위한 직교 부호의 사용을 실험을 통해 제안하였다. 1991년 C. Denz는 직교성을 갖는 Walsh-Hadamard 부호에 따라 기준빔의 위상을 0도와 180도 변조한 위상다중화 체적 홀로그래프 시스템을 실험을 통해 구현하였다.

위상다중화에서 기준빔은 각각의 평면과 단면에 대해 유일한 위상분포를 갖는 직교 위상부호의 집합으로 이루어져 있다. 이러한 직교 위상부호들은 특정한 물체빔과 대응하여 기록과 복원과정에 사용된다. 위상다중화 체적 홀로그래프의 특징은 기준빔의 입사각을 이동시키지 않고, 단지 다른 위상부호만을 생성하여 기준빔에 사용함으로써 홀로그래프를 다중화할 수 있다. 따라서 빠른 정보의 기록 및 복원이 가능하며 완전한 직교 위상부호가 사용된다면 crosstalk 없는 영상복원이 가능하다. 제안된 방법은 광학실험에 의해 증명하였으며 보다 영상누화 없는 깨끗한 복원영상을 얻기 위해 실험에 사용된 여러 가지 요소들에 의한 영상누화를 분석하였다. 또한, 체적 홀로그래프의 효율적인 위상다중화를 위해 기준빔으로 구현되는 네가지 형태의 위상부호에 대한 특성을 분석하였다. 프로그래밍적으로 32×32의 동일한 화소수로 발생된 위상부호에 대해 어드레스빔의 개수를 계산하였고, 실제 광시스템에서 공간광변조기의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%의 에러율을 갖는 위상값을 의도적으로 부가하여 네 가지 형태의 위상부호들에 대한 각각 자기상관성분 및 상호상관성분을 시뮬레이션을 통해 계산함으로써 위상부호간의 crosstalk 및 신호대 잡음비를 비교, 분석하여 효율적인 위상부호를 얻고자 하였다. 그 결과 32×32의 화소수에 대해서는 의사랜덤 위상부호의 상호상관에 의한 평균값이 0.067로 다른 형태의 랜덤위상부호들의 신호대 잡음비와 비교하여 가장 작게 나타났으며, 임의의 어드레스빔에 의한 순간적인 영상누화를 나타내는 표준편차값도 의사랜덤 위상부호가 0.0113으로 가장 작

게 나타났다. 또한, 화소수에 따른 영향을 분석하기 위해 32×32, 64×64, 128×128, 256×256과 같이 어드레스의 빔크기에 해당하는 화소수를 변화시키면서 같은 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 본 론

1. 위상다중화 체적 홀로그래프의 원리

위상다중화 체적 홀로그래프는 일반적인 각다중화 체적 홀로그래프 시스템과 유사하다. 단, 기준빔의 입사각을 제어하는 장치가 위상형 SLM으로 대체되고 기록매질에 입사되는 기준빔과 물체빔은 프리에 변환 렌즈를 통해 입력된다. 기준빔의 입사각은 기록된 정보가 각선택도에 의한 crosstalk 영향을 받지 않도록 브래그 각 이상으로 충분히 분리해서 사용된다. 위상다중화 방법은 동일한 방향으로 입사되는 기준빔으로 모든 정보를 기록하지만 각각의 정보에 대해 입사되는 위상부호를 변화시킴으로써 독립적인 정보의 기록 및 복원이 가능하다.^[10-16] 위상다중화 방법은 기록과 복원시 사용되는 광원의 정확한 정렬없이 빠르게 동작하면서도 낮은 crosstalk을 갖는 높은 광효율의 다중화 시스템으로 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한, SLM에 입력되는 직교 위상부호의 변환만으로 기준빔의 어드레스를 제어하기 때문에 다른 다중화 시스템 보다 간단하면서도 안정적으로 동작할 수 있다. 특히, 이론적으로 직교 위상부호를 이용한 다중화 방법은 crosstalk의 발생이 없고 원하지 않는 노이즈(noise)의 세기를 제거하도록 간섭되기 때문에 노이즈 없는 복원영상을 얻을 수 있다.^[17-19]

그러나 직교 위상부호를 이용한 다중화 방법은 위상부호를 입력하는 PSLM이 갖고 있는 소자 특성과 시스템 구현 환경에 따라 완벽한 직교성을 갖는 위상부호를 광학적으로 사용하기 어렵기 때문에 이로 인한 crosstalk이 발생할 수 있다. 즉, PSLM의 화소간 위상 불균일성과 각 화소의 위상변조 특성의 정확한 제어가 어렵기 때문에 위상부호의 직교특성이 약화되고 이로 인한 crosstalk이 증가될 수 있다.

위상다중화 체적 홀로그래프의 기록 및 복원 과정을 간략하게 나타내기 위해 기록매질의 회절 효율은 기준빔과 물체빔의 간섭으로 생성되는 간섭패턴의 간격과 관련되기 때문에 모든 입사빔을 평면파로 근사화하였다. 일반적으로 복소 크기를 갖는 m 번째 물체빔은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_m = \frac{1}{2} [a_m \exp(jk \cdot r) + c.c.] \quad (1)$$

물체빔의 벡터 k 는 모두 동일하고 공간적인 크기 a_m 으로 부호화 된다. 여기서, $j = \sqrt{-1}$ 이고 r 은 좌표벡터이며 $c.c$ 는 근사화이다. 기록매질 내에서 홀로그램은 물체빔과 위상 변조된 N 개의 기준빔이 동시에 간섭함으로써 형성된다. N 번째 기준빔의 복소 크기는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_n = \frac{1}{2} [p_n \exp(j\varphi_n) \exp(jk_n \cdot r) + c.c.] \quad (2)$$

여기서, 위상의 집합($\phi_1^m, \phi_2^m, \phi_3^m, \dots, \phi_N^m$)은 m 번째 물체빔의 어드레스를 나타낸다. 특정한 영상의 복원은 기록시 사용하였던 기준빔과 관련된 위상부호를 홀로그램에 입사함으로써 정확하게 복원할 수 있다. m 번째 물체빔을 기록할 때 기록매질에 입사된 빔은 식 (3)과 같다.

$$Q_m = \frac{1}{2} [A_m + \sum_{n=1}^N P_n + c.c.] \quad (3)$$

기록매질이 광굴절매질(photorefractive crystal)과 같은 동특성을 갖는다면, 두 빔에 의해 형성되는 홀로그램의 굴절률과 동일한 방향으로 입사된 빔들이 회절된다. 그러나 이러한 상호 작용은 항상 기록매질 내에서 빔들이 전파되는 동안 그 빔들 사이의 에너지와 위상 재분포를 유도한다. 따라서 여러 개의 물체빔을 연속적으로 기록하면 이전에 기록된 홀로그램이 변화되어 기록과정에서 사용된 기준빔들의 상대적인 위상과 크기는 기록과 복원 과정에서 달라지게 된다. 기록매질 내에서 형성되는 강도패턴을 얻기 위해 기록과정시 사용되는 기준빔의 위상과 진폭이 기록매질 내에서 일정하다고 가정하면, 식 (3)으로부터 기록매질 내에서 강도패턴을 얻을 수 있다.

$$|Q_m|^2 = \frac{1}{2} \left\{ |a_m|^2 + \sum_{n=1}^N |p_n|^2 \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{n=1}^N A_m p_n^* \exp(-j\varphi_n^m \times \exp(j(k-k_n) \cdot r)) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^N \sum_{l=1, l \neq n}^N p_n p_l^* \exp(j\varphi_n^m - j\varphi_l^m) \times \exp(j(k-k_n) \cdot r) \right\} \quad (4)$$

여기서, l 은 정수이다. 그 빔들 간에 위상과 에너지 재분포를 무시하기 때문에, 기준빔의 상대적인 위상과 크기는 기록과 복원과정에서 동일하다. 그러므로 N 개의 기준빔

과 영상의 간섭에 의해 유도된 N 개의 홀로그램만이 복원과정에서 중요하다. 두 빔의 간섭 강도에 비례하는 굴절률의 변화는 식 (5)과 같다.

$$\Delta n_m = \frac{1}{2(I_m + I_r)} \times \sum_{n=1}^N a_m p_n^* \{ \delta n_n \exp[-j(\varphi_n^m + \psi)] \times \exp(j(k-k_n) \cdot r) \} \quad (5)$$

여기서, $I_m = \frac{1}{2}|a_m|^2$ 은 물체빔의 강도를 나타내고 ψ 는 간섭 패턴과 그레이팅의 굴절률 사이의 위상편이를 나타낸다. 그리고 $I_R = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N |p_n|^2$ 은 기준빔의 전체 강도이다. δn_n 은 웨이브 벡터가 $k-k_n$ 인 그레이팅의 굴절률 변조의 크기를 나타낸다. 예를 들어, 만약 기록매질이 위에서 언급한 바와 같이 동특성을 갖는 광굴절매질이라면, 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta n_n = \beta \frac{n^3 r_{eff}^n E_{sc}^n}{2} \quad (6)$$

여기서, n 은 굴절률이다. r_{eff}^n 은 효과적인 전자-광학 계수, E_{sc}^n 은 공간전하 전계이다. 그리고 β 는 기록과정에 관련된 요소이다. 이와 같은 방법으로, 모든 물체빔이 기록매질에 중첩되어 기록된다.

p 번째 영상의 복원은 관련된 위상부호와 기록매질에 입사된 기준빔에 의해 이루어진다. crosstalk 없이 p 번째 물체빔을 복원하기 위해 다음과 같은 위상부호는 식 (7)

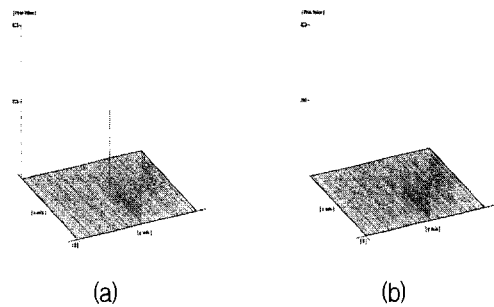


그림 1. 직교 위상부호 상관관계
(a) 동일한 부호간의 상관
(b) 상이한 부호간의 상관
Fig. 1. The correlation of orthogonal phase-code.
(a) The case of the same code
(b) The case of different code

과 같은 조건을 만족해야 된다.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \exp[j(\varphi_n^p - \varphi_n^m)] &= 0, \text{ for } p \neq m \\ \sum_{n=1}^N \exp[j(\varphi_n^p - \varphi_n^m)] &= N, \text{ for } p = m \end{aligned} \quad (7)$$

이와 같이 crosstalk 없이 p 번째의 물체빔을 정확하게 복원하기 위해서는 직교 위상부호가 선택되어야 한다. 그림 1은 식 (7)을 만족하는 직교 위상부호간의 상관관계를 나타낸다.

2. 위상다중화 체적 홀로그램을 위한 위상부호 특성분석

위상부호를 이용하여 기록매질에 여러 개의 영상을 다중화할 경우 정확한 복원영상을 얻기 위해서는 crosstalk을 최소화해야 한다. 각다중화 체적 홀로그램의 경우 crosstalk이 발생되지 않도록 기준빔과 기준빔 사이의 입사각이 브래그조건을 만족하도록 사용하지만 위상다중화 체적 홀로그램의 경우 기록에 사용되는 모든 기준빔들은 동일한 입사각으로 직교성을 갖는 위상부호만을 이용하여 기준빔의 어드레스를 구별하기 때문에 사용되는 위상부호의 직교성이 매우 중요하다. 위상다중화에 사용되는 위상부호의 특성은 동일 위상부호에 의한 자기상관성분(auto-correlation)이 거의 임펄스 함수와 같은 형태를 갖고 있어야 하지만 다른 위상부호에 의한 상호상관성분(cross-correlation)은 존재하지 않아야 한다.

위상다중화 방법에서 위상부호들로 구성된 각각의 기준빔은 균일한 위상분포를 갖는 평면파의 집합으로 구성되며, 위상부호화된 기준빔은 기록하고자 하는 영상의 개수만큼 사용된다. 따라서 N 개의 영상을 기록하기 위해서는 N 개의 위상부호가 필요하다. 기존의 대표적인 위상다중화 방법에는 랜덤확산기나 광섬유의 스펙클 패턴을 이용하는 방법과 “+1”과 “-1”의 두 가지 값을 갖는 HAM(Hadamard matrix)를 이용하는 방법 등이 있다. 랜덤확산기나 광섬유의 스펙클 패턴을 이용하는 위상다중화 방법의 경우 사용되는 PSLM과 같은 광학소자나 시스템 상에서 나타날 수 있는 위상에러에 의한 영향은 랜덤 위상부호의 특성상 문제가 되지 않지만 다른 위상부호에 비해 비교적 많은 상호상관성분으로 인해 많은 영상을 기록할 경우 복원영상 사이의 crosstalk 발생 확률이 높다.

HAM을 이용한 위상다중화 방법은 이론적으로 완전

한 직교성을 갖기 때문에 최근 위상다중화 방법으로 많은 연구가 진행되어 왔다. HAM이 위상다중화 시스템에 이용되기 위해서는 HAM을 구성하는 값들이 SLM을 통해 정확하게 표현되어야 한다. 그러나 SLM을 구성하는 화소들의 위상 불균일성 및 각 화소들을 통한 정확한 위상변조 특성을 얻기 어렵기 때문에 HAM의 직교성이 약화되고 crosstalk이 증가된다. 또한 HAM을 구성하는 요소들은 2^n 형태로 존재하기 때문에 SLM의 화소 이용효율이 낮아진다. 예를 들어, $100(100 \times 100)$ 개의 화소로 구성된 SLM을 이용하여 HAM을 광학적으로 구현할 때, 이용 가능한 SLM의 픽셀수는 $2^6(8 \times 8)$ 개로 한정되어, 거의 절반 정도의 화소만을 사용한다. 따라서 동일한 SLM을 이용한 위상다중화 시스템을 구현할 경우 다른 위상다중화 방법에 비해 낮은 화소 이용률로 기준빔의 어드레스 개수가 크게 제한된다. 이와 같이 위상부호를 이용한 효과적인 위상다중화 체적 홀로그램을 구성하기 위해 요구되는 조건은 많은 어드레스 개수를 갖으면서 crosstalk을 최소화할 수 있도록 광학 시스템 상에서 발생하는 위상에러에도 강건한 직교성을 갖는 위상부호가 요구된다.

본 논문에서는 많은 어드레스 개수를 갖음과 동시에 광학적 위상변조 특성에도 강건한 2차원 의사랜덤 위상부호(PSC:pseudo-random code) 위상부호를 제안하고자 한다. 일반적으로 PSC는 궤환 쉬프트 레지스터(feedback shift register)에 의해 발생하는 확산부호로서 랜덤하게 발생하는 0과 1의 개수가 1개 밖에 차이나지 않아 밸런스한 특성으로 인한 상호상관성분이 낮다. 이와 같은 특성으로 인해 큰 비화성이 요구되는 CDMA 통신이나 암호화 시스템에 널리 사용되고 있다.

3. 위상에러를 고려한 위상부호 특성 비교

위상다중화 방법에 사용되는 위상부호에 의도적인 위상변조 에러값을 삽입하여 실제 광학 시스템에 적용될 경우에 발생가능한 위상변조 에러에 대한 강건성을 비교, 분석하였고 이러한 위상부호들의 동일 조건 하에 생성가능한 어드레스 개수를 비교함으로써 보다 효율적인 위상부호를 제안하고자 한다. 그림 2은 제안된 위상부호를 나타낸다.

그림 2(a)는 순수한 랜덤 위상부호 PRC(Pure Random Code)로서 랜덤 확산기나 광섬유의 스펙클 패턴 등에 의해 간단하게 생성될 수 있지만 특정한 영역에 “-1”과 “+1”의 위상값이 집중될 가능성으로 인하여 높은 상호상관값을 갖을 수 있다. 또한, 여러 개의 위상부호를 이용하

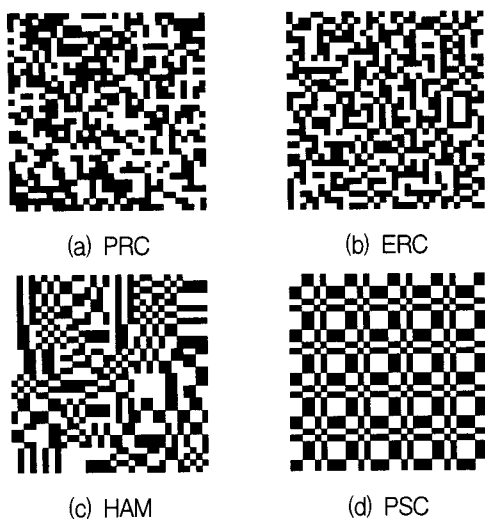


그림 2. 실험에 사용된 위상부호(32×32)
Fig. 2. Phase codes for experiment(32×32).

여 상호상관값을 구할 경우 “-1”과 “+1”의 위상값의 집중도가 랜덤한 분포를 갖기 때문에 불규칙적인 상호상관값을 갖게 된다. PRC의 어드레스 개수, M_{PRC} 은 SLM에 입력되는 위상부호의 화소수가 $n \times n$ 일 때, 하나의 화소는 “-1”과 “+1”의 두 가지 발생 가능한 위상값을 갖기 때문에 순열의 수 ${}_n P_r$ 에 의해 식 (8)과 같이 나타난다.

$$M_{PRC} = (2!)^{n^2} \quad (8)$$

그림 2(b)는 PRC의 단점을 보완하기 위해 생성된 Random Code with Equality(ERC)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 2(b)에서와 같이 PRC에 비해 부분적으로 같은 부호가 집중되는 것이 덜하다. 또한, ERC의 경우 블록단위의 레벨에 따라 나타나는 상호상관성분과 위상부호의 개수가 다르게 나타난다. ERC의 위상부호 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 (9)와 같이 나타난다.

$$M_{B-ERC} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right) \quad (9)$$

여기서, 위상부호의 화소수를 $n \times n$ 라고 하면, 블록단위

가 m -level일 경우 조합의 수 ${}_n C_r$ 에 의해 ERC의 위상부호 개수, M_{ERC} 은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{ERC} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right)^{\left(\frac{n}{m}\right)^2} \quad (10)$$

그림 2(c)는 직교부호인 HAM을 나타낸 것으로 SLM을 통한 광학적 구현이 용이하지만 일반적으로 2의 정수 제곱 형태로 구현되므로 어드레스로 사용가능한 위상부호의 개수가 크게 제한된다. 즉, $100(10 \times 10)$ 개의 화소수를 갖는 SLM을 사용할 경우, 이용할 수 있는 화소의 개수는 $64(2^3 \times 2^3)$ 으로 약 56%정도의 낮은 이용효율을 갖는다.^[8] 또한, 상용 SLM의 비선형성과 액정을 감싸고 있는 유리의 막두께의 비균일성 등으로 인하여 구성성분들의 정확한 위상변조가 요구되는 HAM은 구성성분들이 랜덤한 분포를 갖는 다른 세 가지 위상부호 방법에 비해 광학적 위상에러에 대한 강건성이 떨어진다. 식 (11)는 HAM의 어드레스로 사용가능한 위상부호의 개수, M_{HAM} 을 나타낸다.

$$M_{HAM} = 2^n \quad (11)$$

그림 2(d)는 2차원 PSC로서 대역확산 통신시스템에서 동일한 대역폭에서 최소의 간섭을 갖도록 정보를 부호화하는데 사용되는 것으로서, 가장 일반적이고 간단한 1차원적인 PSC 발생기는 그림 3과 같이 구성된 케환 쉬프트 레지스터에 의해 얻을 수 있다.

쉬프트 레지스터는 초기화된 레지스터의 임의의 n 번째 값과 마지막 m 번째 값을 XOR한 후, 여기서 얻어진 결과값을 다시 입력하는 형태로 구성된다. 레지스터의 각 부호(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 PSC를 이용하여 2차원

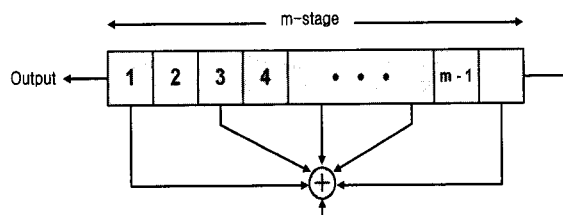


그림 3. 1차원 케환 쉬프트 레지스터
Fig. 3. 1-D Feedback shift register.

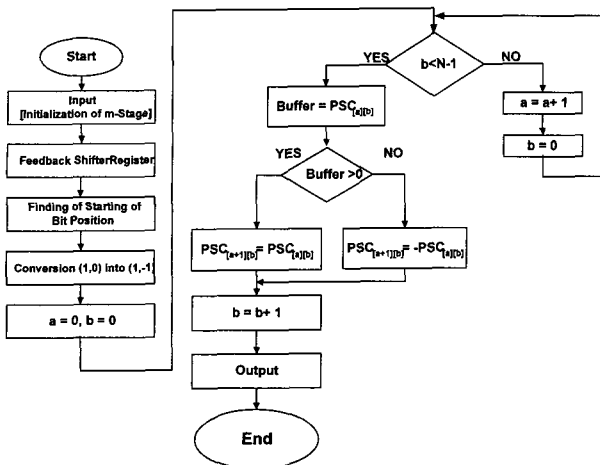


그림 4. 2차원 PSC의 흐름도

Fig. 4. Flow chart of the 2-D PSC.

로 확장할 경우 1차원으로 생성된 PSC의 부호값들을 순서적으로 추출한 후, 부호값이 "1"이면 1차원 PSC를 그대로 사용하고, "0"이면 부호값들을 반전한 1차원 PSC를 처음 생성된 1차원 의사 랜덤부호열의 순서대로 확장시키면 2차원 의사 랜덤부호를 얻을 수 있다. 이러한 방법에 의해 $n \times n$ 의 화소수와 m 개의 레지스터를 사용한 경우 생성 가능한 PSC의 어드레스 개수 M_{PSC} 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{PSC} = 2(2^m - 1)^2(m - 1)(n - 1) \quad (12)$$

이와 같은 2차원 PSC를 위상형으로 이용하기 위해서는 "0"으로 된 부호를 "-1"로 변환시켜야 한다. 그림 4은 2차원 PSC의 발생과정을 나타낸 것이다.

표 1은 식 (8), 식 (10), 식 (11), 그리고 식 (12)에 의해 32×32 의 화소수를 갖는 위상부호에 대한 각 위상부호의 어드레스 개수를 나타낸 것이다.

이러한 수치는 발생가능한 경우의 수를 종합한 결과값으로 ERC가 가장 많은 어드레스 개수를 생성할 수 있으며, HAM의 경우 가장 적은 어드레스의 개수가 생성될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과값은 전

표 1. 각 위상부호에 의한 어드레스 개수(32×32)
Table 1. Address number in phase code(32×32).

구분	Phase Code (32×32)				
	PRC	ERC (2level)	ERC (4level)	HAM	PSC
어드레스 개수	2.8×10^{71}	1.6×10^{199}	1.0×10^{263}	4.3×10^9	1.8×10^{19}

체 발생가능한 경우의 수를 나타낸 것으로 모든 경우의 수를 실제 시스템에 적용하기에는 구현상 한계가 있다.

4. 위상에러를 고려한 위상부호 crosstalk 영향 분석

실제적인 광학시스템 구현시 위상부호가 입력되는 SLM의 비선형적인 특성과 기타 광학시스템에서 발생될 수 있는 위상에러의 평균합으로 인한 위상변조 에러를 고려하여 각각의 위상부호들에 각각 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%씩의 오차율을 갖는 위상에러를 의도적으로 부가하여 이로 인한 crosstalk 영향을 분석하였다. $f(x,y)$ 와 $g(x,y)$ 를 각각 위상에러가 삽입되기 전과 후의 위상부호라고 한다면, 식 (13)과 같이 위상에러가 부과된 위상부호로 구성된 기준빔을 나타낼 수 있다.

$$g(x,y) = f(x,y) + e(x,y) \quad (13)$$

여기서, $e(x,y)$ 는 위상부호에 의도적으로 부과될 위상 에러 함수로 위상부호 -1과 +1에 대하여 위상오차를 갖으며, 위상부호의 전체 크기에 부분적으로 랜덤하게 삽입된다. 이러한 위상부호들에 의한 crosstalk 영향을 분석하기 위해 식 (14)과 같이 위상부호들에 대한 상관관계를 조사하였다. 이때 $G(f_x, f_y)$ 를 위상부호에 의한 기준빔 $g(x,y)$ 에 대한 푸리에 변환이라고 한다면 기록질에 전파되는 기준빔들 간의 상관성분은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FT\{|g(x,y)|^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_i(f_x, f_y) G_j^*(\xi - f_x, \eta - f_y) d\xi d\eta \quad (14)$$

여기서 G_i 와 G_j 는 i 와 j 번째의 기준빔을 각각 나타내며, FT 는 푸리에 변환을 의미한다. 체적 홀로그래프 시스템에서 crosstalk의 발생을 최소로 제한하기 위해서는 식 (15)과 같은 조건을 만족해야 한다. 즉, 어드레스빔의 자기상관성분은 델타함수로 근사화됨과 동시에 상호상관성분은 제거되어야 한다.

$$FT\{|g(x,y)|^2\} \approx \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (15)$$

식 (16)는 1로 정규화된 자기상관성분에 대한 상호상관성분의 비를 이용하여 위상부호의 SNR을 나타낸 것

으로 상호상관성분은 식 (16)에 나타난 바와 같이 SNR과 반비례하므로 상호상관성분의 발생을 최소화하면 SNR이 향상된다.

$$SNR[dB] = 10\log_{10} \frac{A_i}{C_i} \quad (16)$$

여기서, A_i 와 C_i 는 각각 정규화된 자기상관성분값과 상호상관성분값을 나타낸다. 또한, 다중화 방법에 의해 여러 개의 기록된 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 (17)과 같이 주어진다.

$$E(x) \equiv m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad (17)$$

여기서, $E(x)$ 와 m_x 는 x 에 대한 평균값을 나타내고, $p(x)$ 는 x 의 확률밀도함수로 x 가 발생할 확률값을 의미한다. 따라서, x 의 변화율과 표준편차는 각각 식 (18)과 식 (19)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E[(x - m_x)^2] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 p(x)dx \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &= E[(x^2 - 2xm_x + m_x^2)] \\ \sigma_x &= \sqrt{E[(x^2 - 2xm_x + m_x^2)]} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (16)과 (17) 그리고 식 (19)에 의해 얻어진 상관관계에 대한 평균값과 표준편차값을 이용하여 시뮬레이션에 사용된 각각의 위상부호에 대한 crosstalk의 영향 및 위상부호들의 안정적인 동작을 분석하여 위상다중화 체적 홀로그래프 시스템에 안정적으로 사용될 수 있는 보다 효율적인 위상부호를 제시할 수 있다.

III. 실험

그림 5는 위상변조시 비선형적인 특성으로 인한 SLM의 위상에러를 고려하여 각각의 위상부호들에 0%에서 25%로 위상에러를 변화시키면서 얻은 SNR을 나타낸 결과이다. 이때 얻어진 각각의 위상부호들에 대한

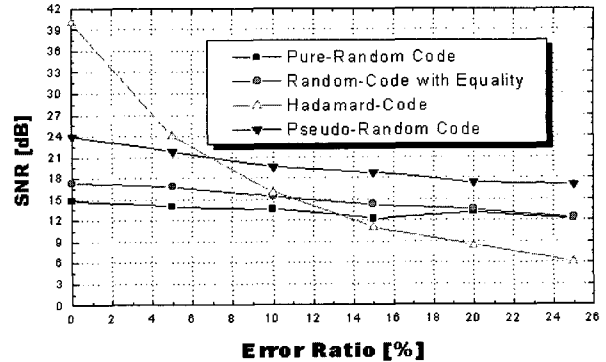


그림 5. 위상에러에 따른 SNR
Fig. 5. SNR according to phase error.

SNR은 통계적인 근사값을 얻기 위해 32×32의 동일한 화소수로 랜덤하게 발생된 501개의 다른 위상부호에 대한 자기상관성분과 상호상관성분의 평균값을 이용하였다.

그림 5에서 보여진 바와 같이 위상에러에 대한 변화는 7%까지는 HAM이 가장 좋은 SNR을 나타내고 있으나 10%이후에는 위상에러에 따른 영향이 비교적 심함을 알 수 있다. 이것은 HAM의 경우 위상에러가 존재하지 않는 경우 완전한 직교부호로 사용될 수 있지만 SLM을 이용하여 많은 양의 영상을 기록할 경우 SLM의 비선형적인 위상특성 및 광학시스템 상에서 발생할 수 있는 위상에러로 인해 crosstalk의 영향을 받을 가능성이 많아진다는 것을 의미한다. 그러나 랜덤한 위상특성을 갖는 다른 위상부호들의 경우 비선형적으로 랜덤한 위상에러에도 고유의 랜덤한 특성으로 인하여 비교적 영향을 덜 받는다. 특히, 그림 5에서와 같이 프로그램적으로 직교성을 갖도록 설계된 2차원 PSC의 경우 다른 랜덤 위상부호들에 비해 위상에러의 영향을 가장 최소화시킬 수 있다.

그림 6, 7, 8, 9은 그림 5에서 얻어진 결과를 이용하여 위상에러의 영향이 미치기 시작하는 10%의 위상에러를 32×32의 동일한 화소수로 생성된 각각 501개의 PRC, ERC, HAM 및 PSC에 삽입한 후, 임의로 선택한 두 개의 위상부호를 상관시켜 얻은 자기상관성분과 상호상관성분을 1로 정규화 하여 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 자기상관성분들은 전체적으로 델타함수로 근사화되지만 crosstalk에 비교적 많은 영향을 미치는 상호상관성분의 경우 위상부호에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다. 위상부호에 대한 500번의 상호상관결과의 최대값은 0.16, 0.11, 0.14, 0.054으로 각각 나타났다. 실험에서 보는 바와 같이 2차원 PSC는 자기상관 특성과 상호상관 특성에 있어서 다른 위상부호

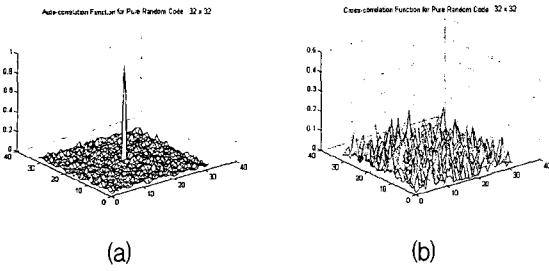


그림 6. PRC에 의한 상관성분

(a) 자기상관 (b) 상호상관

Fig. 6. Correlation values of PRC

(a) Auto-correlation (b) Cross-correlation

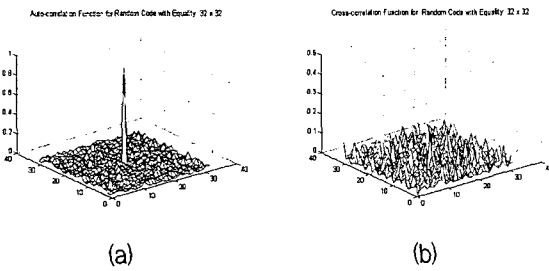


그림 7. ERC에 의한 상관성분

(a) 자기상관 (b) 상호상관

Fig. 7. Correlation values of ERC.

(a) Auto-correlation (b) Cross-correlation

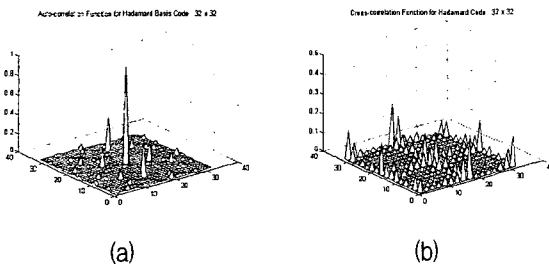


그림 8. HAM에 의한 상관성분

(a) 자기상관 (b) 상호상관

Fig. 8. Correlation values of HAM.

(a) Auto-correlation (b) Cross-correlation

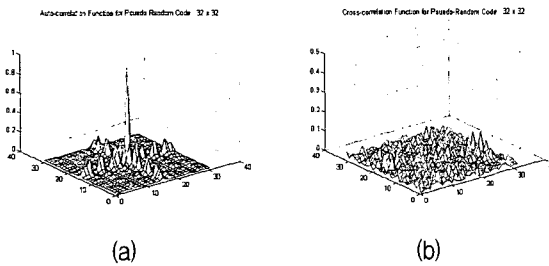


그림 9. PSC에 의한 상관성분

(a) 자기상관 (b) 상호상관

Fig. 9. Correlation values of PSC.

(a) Auto-correlation (b) Cross-correlation

들에 비해 위상다중화 방법에 필요한 특성을 비교적 잘 만족하고 있다. 즉, 자기상관성분은 임펄스 함수와 같은 형태를 갖고 있으면서 다른 위상부호들에 의한 상호상관성분은 상대적으로 낮게 존재하여 crosstalk의 영향을 비교적 덜 받는다.

그림 10, 11, 12 그리고 13은 마찬가지로 방법으로 10%의 위상에러를 각각의 위상부호에 삽입한 후, 임의로 선택된 하나의 위상부호를 다른 500개의 위상부호와 각각 상호상관시킨 결과를 나타낸 것이다. 위상다중화 체적 홀로그램 시스템의 위상부호는 상호상관값이 낮아야 하고, 동시에 모든 위상부호들의 상호상관 값이 거의 일정해야 연속적인 복원영상을 관측시 임의의 복원영상에 의한 이미지의 질 저하를 방지할 수 있다. 그림 10의 PRC는 500개의 서로 다른 PRC와의 상호상관 결과 위상에러에는 비교적 큰 영향이 없지만 상호상관 값이 HAM과 함께 가장 크고 몇 개의 다른 PRC와는 20% 이상의 상호상관값이 검출됨에 따라 고밀도 위상다중화시 안정적으로 동작하지 못하여 부분적인 crosstalk을 유발시킬 수 있다. 그림 11의 ERC는 PSC와 함께 상호상관 결과에 대해 10% 내외로 PRC나 HAM의 절반 수준이다. ERC는 블록 단위로 랜덤한 값들을 생성시킴으로서 특정 영역에 존재하는 같은 성분들로 인한 상관성은 극복할 수 있지만 전체적으로 볼 때, 존재하는 성분들의 랜덤성과 균일성을 항상 유지할 수 없기 때문에 비교적 위상에러가 존재해도 직교성을 보장할 수 있으나 PRC와 마찬가지로 일부 위상부호의 불안전성으로 인해 crosstalk이 발생할 수 있다. 그림 12의 HAM은 이론적으로는 완벽한 직교성을 갖지만 다른 위상부호에 비해 위상에러에는 매우 민감하게 반응하여 상호상관값들이 전체적으로 15% 내외로 나타난다. 따라서 HAM

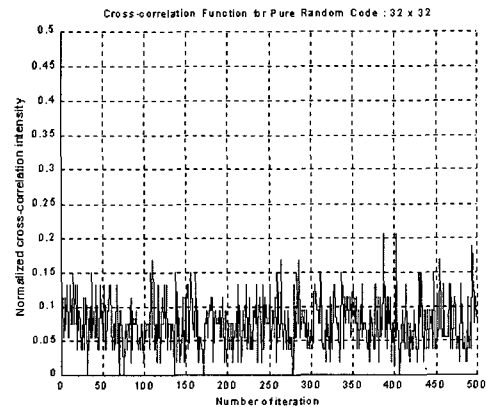


그림 10. PRC 상호상관 결과(iteration : 500)

Fig. 10. Cross-correlation result of PRC(iteration : 500)

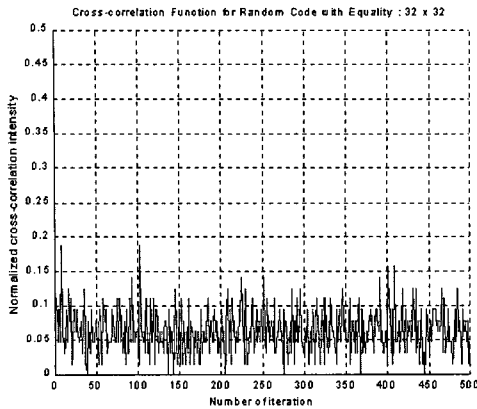


그림 11. ERC 상호상관 결과(iteration : 500)
 Fig. 11. Cross-correlation result of ERC(iteration : 500).

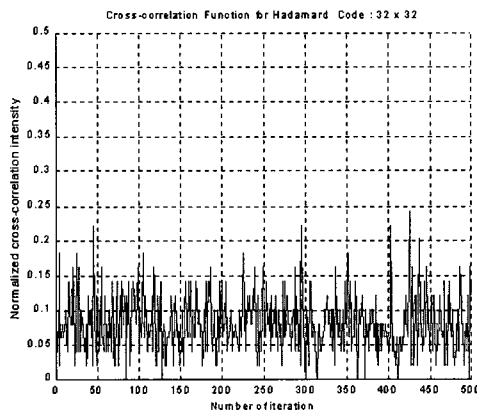


그림 12. HAM 상호상관 결과(iteration : 500)
 Fig. 12. Cross-correlation result of HAM(iteration : 500).

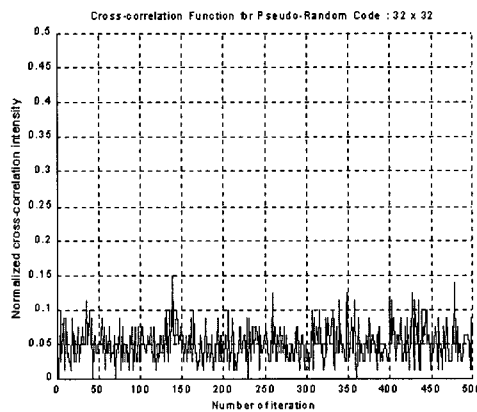


그림 13. PSC 상호상관 결과(iteration : 500)
 Fig. 13. Cross-correlation result of PSC(iteration : 500).

을 이용한 위상다중화 체적 홀로그램에서는 각각의 화소가 정확하게 입력된 값을 디스플레이 할 수 있는 PSLM(phase spatial light modulator)이 요구된다. 그림 13에서 나타나는 PSC에 대한 서로 다른 위상부호에 대해 10% 이하의 상관성분으로 직교성이 보장되고 특정 PSC에 의한 crosstalk 영향이 다른 위상부호들에 비해

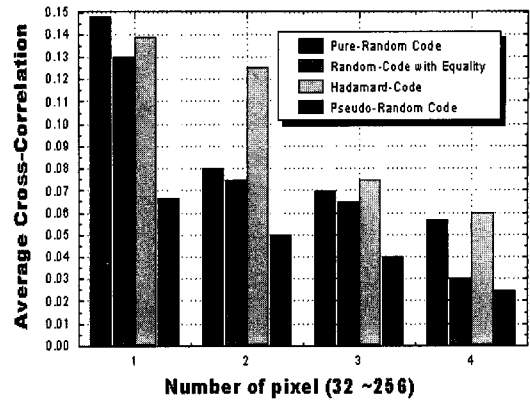


그림 14. 화소수에 따른 상호상관성분의 평균값 (iteration : 500)

Fig. 14. Mean values of cross-correlation dependence on number of pixel (iteration : 500)

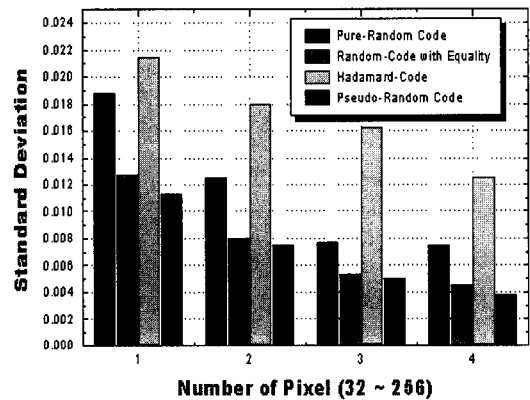


그림 15. 화소수에 따른 상호상관성분의 표준편차 (iteration : 500)

Fig. 15. Standard deviation of cross-correlation dependence on number of pixel (iteration : 500)

안정적이다.

그림 14와 15는 위상부호의 크기에 따른 각 위상부호의 crosstalk 영향을 분석하기 위해 위상부호의 화소수를 32×32, 64×64, 128×128, 그리고 256×256으로 변화시키면서 앞서와 같은 방법으로 각각의 경우에 대하여 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차를 구한 것이다. 그림 14의 세로축은 위상부호의 화소수를 차례로 표현한 것으로 위상부호의 화소수가 증가할수록 전체적인 상호상관에 의한 평균값이 감소함을 알 수 있다. 표준편차에 의한 상호상관값의 변화율 분석에서도 마찬가지로 위상부호의 화소수가 증가할수록 작아짐을 볼 수 있다. 이것은 위상부호의 화소수가 증가함에 따라 모든 위상부호가 위상에러에 강건한 특성을 갖으며 임의의 인접된 위상부호에 의한 crosstalk이 발생될 확률이 낮아진다는 것을 의미한다. 그림 14와 15에서처럼

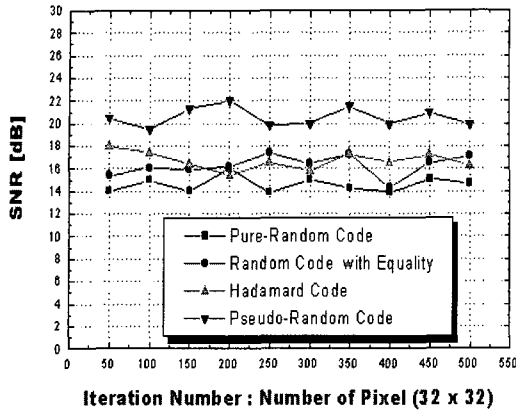


그림 16. 위상부호 방법에 따른 SNR
Fig. 16. SNR dependence on phase coding schemes.

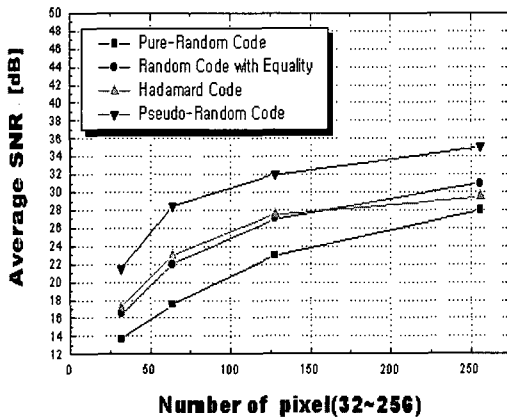


그림 17. 화소수에 따른 SNR의 변화
Fig. 17. SNR dependence on number of pixel.

crosstalk에 영향을 주는 상호상관성분의 평균값과 표준편차값의 분포로 보아 PSC가 전체적으로 가장 나쁜 특성을 갖는 PRC 보다는 평균값에 있어서 위상부호의 화소수에 따라 약 2~3배 정도 낮게 나타나며, HAM에 비해서도 약 1.5~2배 정도 낮게 나타났다. 또한, 표준편차값에 있어서도 변동폭이 가장 심하게 나타나는 HAM에 비하여 약 2~3배 정도 차이가 남을 알 수 있다.

그림 16은 위상부호에 따른 SNR의 변화를 통계적으로 나타내기 위해 32×32의 같은 화소수를 갖는 네 가지 위상부호들을 각각 501개씩 랜덤하게 발생시켜 임의의 한 위상부호의 자기상관성분과 나머지 다른 500개의 위상부호 사이에 상호상관성분을 이용하여 SNR을 얻은 것이다. 이때, 다른 500개의 위상부호에 1부터 500번으로 순서를 정하여 50개 단위로 SNR의 평균값을 구하였다. 그림 17은 같은 방법으로 화소수를 64×64, 128×128, 그리고 256×256으로 점차적으로 증가시킬 경우 500개에 대한 SNR 평균값의 변화를 각각의 위상부호의 픽셀 수 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림 16과 17에서 보는

표 2. 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값, 표준편차와 SNR

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

상호상관	Phase Code (32 × 32)				
	PRC	ERC (2level)	ERC (4level)	HAM	PSC
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

바와 같이 화소수에 비례하여 전체적인 SNR이 증가하지만 PSC은 다른 위상부호들에 비하여 SNR이 약 1.5배 정도 높게 나타남을 알 수 있다.

표 2는 앞에서 언급한 네 가지 방법에 의해 생성된 32×32의 크기를 갖는 위상부호를 이용하여 500번의 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차값을 비교하여 나타낸 것이다. PSC에 의한 상호상관성분 결과가 다른 방법들에 비하여 평균값이 거의 두 배 정도 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.

IV. 결론

위상다중화 체적 홀로그램 시스템에 사용될 가장 효율적인 위상부호를 구현하기 위해 기존에 위상다중화에 많이 사용되고 있는 HAM을 비롯하여 PRC, ERC 및 PSC에 대한 SNR과 위상부호의 어드레스 개수를 비교, 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 각각의 방법들은 실제적인 광시스템에서 위상부호를 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 위상부호 어드레스를 사용하였다. 또한, 기준빔의 크기변화에 대한 영향을 분석하기 위해 화소수를 32×32, 64×64, 256×256, 그리고 512×512 하여 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 사용된 위상부호들은 위상 에러의 변화에 따른 HAM의 SNR이 PSC보다 많은 영향을 받기 시작하는 10%의 위상에러 각각의 위상부호에 삽입된 것이다. 32×32의 빔크기를 기준으로 할 때 상호상

관의 특성은 PSC에 의하여 구현된 위상부호의 평균값이 0.067로 crosstalk에 의한 영향이 평균적으로 다른 방법들에 비하여 거의 2배정도 낮기 때문에 상대적으로 높은 SNR을 갖음을 알 수 있다. 또한, PSC의 표준편차값이 0.0113으로 가장 낮게 나타나기 때문에 특정한 기준빔에 의한 crosstalk 발생 확률이 가장 낮은 것으로 나타났다. 그리고 기준빔의 화소수가 증가함에 따라 PSC를 비롯한 모든 위상부호들이 거의 선형적으로 SNR이 향상되었다. 따라서, 위상변조 에러를 고려한 실제적인 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상 다중화 방법으로 PSC를 사용할 경우 다른 방법들에 비하여 상대적으로 높은 SNR과 안정적인 위상부호를 갖는 기준빔의 구현이 가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. G. Kim, K. T. Kim, and E. S. Kim, "Non-mechanical angular multiplexed holographic memory system using moving window on liquid crystal display" *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 38, Pt.22, no. 1A/B, 1999.
- [2] S. G. Kim, H. S. Lee, K. T. Kim, E. S. Kim, and B. H. Lee, "Angular multiplexing holographic memory system based on moving window on liquid crystal display and its crosstalk analysis" *Optical and Quantum Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 419-430, 2000.
- [3] K. T. Kim, B. C. Cho, E. S. Kim, S. K. Gil "Performance analysis of phase codes multiplexed holographic memory", *Appl. Opt.* vol. 39, no. 23, 2000.
- [4] K. T. Kim, B. C. Cho, E. S. Kim, "Phase-error considerations for the practical phase code multiplexed holographic memory," *Jpn. J. of Appl. Phys.*, vol. 39, no. 5A, pp. 2635-2638, 2000
- [5] J. T. LaMacchia and D. L. White, "Coded multiple exposure holograms," *Appl. Opt.* 7, 91-94, 1968.
- [6] Y. Kobayashi, Y. Igasaki, N. Yoshida, and N. Fukuchi, "Compact high-efficiency electronically-addressable phase-only spatial light modulator," *Proceedings of SPIE*, vol. 3951, pp. 158-165, 2000.
- [7] 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.
- [8] T. F. Krile, M. O. Hagler, W. D. Redus, and J. F. Walkup, "Multiplex holography with chirp-modulate binary phase coded reference beam masks," *Appl. Opt.* 18, 52-56, 1979.
- [9] 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.
- [10] 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 Letters*, vol. 21, No. 4, 1996.
- [11] C. Alves, G. Pauliat, and G. Roosen, "Dynamic phase-encoding storage of 64 images in a BaTiO₃ Photorefractive crystal," *Optics Letters*, vol. 19, No. 22, 1994.
- [12] X. Yang, Y. Xu, and Z. Wen, "Generation of Hadamard Matrices for phase-code-multiplexed holographic memories," *Optics Letters*, vol. 21, No. 14, 1996.
- [13] X. Yang, Z. Wen, Y. Xu, and N. Li, "Hadamard codes of $m \neq 2^n$ in phase-code multiplexed holographic memories," *Optical Engineering*, vol. 35, No. 12, 1996.
- [14] J. Nakayama, "Formulas on Orthogonal Functionals of Stochastic Binary Sequence", *IEICE Trans. Fundamentals*. vol. E80 A. No. 4, 1997.
- [15] J. E. Ford, Y. Fainman, and S. H. Lee, "Array interconnection by phase-coded optical correlation," *Optics Letters*, vol. 15, No. 19, 1990.
- [16] X. Yang, Z. Gu, "Three-dimensional optical data storage and retrieval system based on phase-code and space multiplexing," *Optical Engineering*, vol. 35, No.2, 1996.
- [17] Mark A. Neifeld, and M. McDonald, "Technique for controlling cross-talk noise in volume holography," *Optics Letters*, vol. 21, No. 16, 1996.
- [18] G. Zhang, S. Liu, G. Tian, J. Xu, Q. Sun, and Guangyin Zhang, "New noise-suppression technique in photorefractive crystals," *Applied Optics*, vol. 36, No.8, 1997.
- [19] J. Hong, Ian McMichael, and Jian Ma, "Influence of phase masks on cross talk in holographic memory", *Optics Letters*, vol. 21, No. 20, 1996.

저 자 소 개



조 종 덕(정회원)
 1979년 광운대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 1982년 경희대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 2001년 광운대학교
 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 광저장장치, 컴퓨터네트워크 반도체
 계면현상, 제어계측>



김 규 태(정회원)
 1996년 광운대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 1998년 광운대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 2002년 광운대학교
 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 홀로그래픽 디스플레이, 광저장장
 치, 워터마킹, DRM>