1999 年度 大韓電子工學會 夏季綜合學術大會 論文集 第 22 卷 第 1 號 99/6

의사랜덤코드를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상 다중화 인코딩에 관한 연구

°조 병 철*, 김 규 태*, 길 상 근**, 김 은 수*
*광운대학교 전자공학과
**수원대학교 전자공학과
Tel : 02-940-5118, Fax ; 02-941-5979

A Study on a Phase-encoded Multiplexing Method with Pseudo Random Code in Holographic Memory System

°Byoung-Chul Choi, Kyu-Tae Kim, Eun-Soo Kim
*Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.
**Dept. of Electronic Eng., Suwon Univ.
iron@explore.kwangwoon.ac.kr

요 약

본 논문에서는 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템에서 사용될 최적의 위상코드를 구현하기 위해 기존에 위상 다중화에 많이 사용되고 있는 Hadamard 행렬을 비롯한 여러 행태의 랜덤 위상코드들의 상호상관값에 의한 cross talk의 영향 및 신호대 잡음비, 그리고 어드레스 갯수를 비교 분석하였다.

서 론

홀로그래픽 메모리의 저장용량은 다중화 기술에 의해 결정되는데 지금까지 연구된 다중화 방법에는 어드레스의 각도가 저장된 영상의 입력된 주소가 되는 각 다중화[1], 가변되는 파장의 광원을 이용하는 파장 다중화[2], 서로 직교하는 위상을 이용하는 위상코드 다중화[3] 등이 연구되고 있다. 이러한 방법들 중에서 위상코드 다중화 방법은 비교적 간단한 구조의 시스템으로 기계적인 움직임 없이 정확하면서 고속의 랜덤 엑세스에 의한 다중화가 가능하다는 장점등으로 사람들에 의해 연구되어 왔다. 1977년 T. Krile와 Morozov[4]에 의해 각선택도를 갖지 않은 평면홀로그램에서 기준빔을 코드화하여 cross talk을 최소화할 수 있는 조건을 발표한 이 후, 1982년에는 E. Kral[5]이 랜덤확산기를 이용하여 볼륨 홀로그램을 위한 직교코드의 사용을 실험을 통해 제안하였고, 1991년에는 C. Denz[6]와 Y. Taketomi에 의해 직교성을 갖는 Hadamard 행렬을 위상형 공간광변조기를 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 π의 정확한 위상변조 및 어드레스빔들 간의 직교성이 보장됨과 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 행렬의 위상코드 다중화의 경우, Hadamard 행렬이 갖는 직교 특성과 광학적 구현이 용이하다는 장점이 있지만 위상 변조시 사용되는 기존의 SLM의 전자적 및 물리적 특성으로 위상변조에러가 발생할 수 밖 에 없으며, 이로 인해 cross talk에 많은 영향을 미치게 된다. 그리고 Hadamard 행렬은 2의 거듭제곱으로만 구현하기 때문에 SLM의 이용 효율이 낮으며, 많은 수의 어드레스를 갖지 못한다는 단점을 갖고 있다.

따라서 본 논문에서는 위상코드로 사용될 수 있는 여러 가지 코드들을 프로그램적으로 생성한 후 SLM의 비선형적 위상변조특성을 고려하여 모든 위상코드에 ±10%의 오차를 갖는 위상변조 에러를 강제적으로 랜덤하게 삽입하여 이에 대한 어드레스의 개수 및 자기상관성분과 상호상관 성분들을 구하고 이것을 이용하여 cross talk및 SNR을 비교 분석함으로서 실제 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상코드 다중화에 적용하기 위한 최적의 위상인코딩 방법을 제시하고자 한다.

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 식 (1)과 같이 프로그램적으로 구현된 모든 위상코드들에 강제적으로 ±10%의 오차를 갖도록 위상에러를 부과하였다. $f(x,y)$와 $g(x,y)$를 각각 위상에러가 삽입되기 전과 후의 어드레스빔이라고 한다면, 식 (1)과 같이 ±10%의 위상에러가 부과된 위상코드 어드레스빔을 나타낼 수 있다.

$$g(x,y) = f(x,y) + e(x,y) \tag{1}$$

여기서, $e(x,y)$는 위상코드에 강제적으로 부과될 위상에러 함수로 위상코드 -1과 +1에 대하여 ±10%의 오차를 갖으며, 위상코드의 전체 크기에 부분적으로 랜덤하게 삽입된다. 이러한 방법에 의해 SLM에 의한 위상코드와 유사하게 표현된다고 가정하면, 위상코드들은 렌즈에 의해 복소함수 형태로 광굴절매질에 전파되어 위상코드 다중화 방법의 어드레스로 동작하게 된다. 따라서 이러한 어드레스들에 의한 cross talk을 분석하기 위해 식 (2)와 같이 어드레스들에 대한 상관관계를 조사하였다. 이때 $G(f_X,f_Y)$를 어드레스빔 $g(x,y)$에 대한 퓨리에 변환이라고 한다면 광굴절매질에 전파되는 어드레스빔들 간의 상관성분은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$FT\{|g(x,y)|^2\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G_i(f_X,f_Y) \times G_j^*(\xi-f_X,\eta-f_Y)\,d\xi\,d\eta \tag{2}$$

여기서 G_i와 G_j는 i와 j번째의 어드레스빔을 각각 나타내며, FT는 퓨리에 변환을 의미한다. 홀로그래픽 메모리 시스템에서 cross talk의 발생을 최소로 제한하기 위해서는 식 (3)과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} FT\{|g(x,y)|^2\} &\approx 1 \quad \text{if } i=j \\ &\approx 0 \quad \text{if } i\neq j \end{aligned} \tag{3}$$

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 (4)와 같이 주어진다.

$$E(x) \equiv m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \tag{4}$$

여기서, $E(x)$와 m_x는 x에 대한 평균값을 나타내고, $p(x)$는 x의 확률밀도함수로 x가 발생될 확률값을 의미한다. 따라서, x의 변화율과 표준편차는 각각 식 (5)와 식 (6)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\sigma_x^2 = E[(x-m_x)^2] = \int_{-\infty}^{\infty}(x-m_x)^2 p(x)dx = E[(x^2-2xm_x+m_x^2)] \quad (5)$$

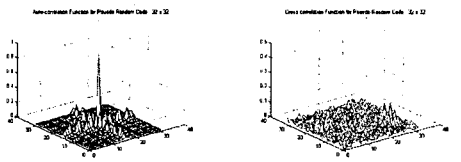
$$\sigma_x = \sqrt{E[(x^2-2xm_x+m_x^2)]} \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)에 의하여 얻어진 상관관계에 대한 평균값과 표준편차값을 이용하여 시뮬레이션에 사용된 각각의 위상코드에 대한 cross talk의 영향 및 어드레스들의 안정적인 동작율을 분석하여 홀로그래픽 메모리 시스템의 어드레스빔에 안정적으로 사용될 수 있는 최적의 위상코드를 제시할 수 있다.

시뮬레이션 및 결과분석

본 논문에서는 위상코드 다중화 방법에 사용될 수 있는 네 가지의 위상코드에 대한 자기상관성분과 상호상관성분을 시뮬레이션을 통해 비교 분석함으로써 최적의 위상 인코딩 방법을 제시하고자 한다. 어드레스빔의 사용될 기준빔의 크기는 32×32픽셀로 설정하고 작은 오차범위에서 정확한 결과를 얻기 위해 비교적 많은 양인 501개의 서로 다른 어드레스빔을 각각 랜덤하게 발생시킨 후, 임의로 하나의 어드레스빔을 선택하여 나머지 다른 500개의 어드레스빔과 상관시켰다. 또한 상호상관시킨 값에 대한 통계적인 결과를 유추하기 위해 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차를 구하여 보다 홀로그래픽 메모리 시스템에 보다 적합한 위상코드를 제시하고자 하였다. 즉, 상호상관값이 작으면서 500번에 대한 상관값의 변화율이 작은 위상코드를 찾고자 하였다. 이러한 시뮬레이션 과정은 위상코드를 SLM으로 구현할 경우 실제적으로 발생될 수 있는 "0"과 "π" 변조의 에러를 고려하여 임의적으로 생성시킨 랜덤 에러값을 모든 위상코드에 삽입하여 시뮬레이션을 수행함으로서 보다 실제적인 광학적 구현에 적합한 방법을 제시하였다.

그림 1은 PSR의 방법으로 생성된 501개의 위상코드들 중에서 임의로 선택한 두 개의의 어드레스빔을 상관시켜 얻은 자기상관성분과 상호상관성분을 1로 정규화 하여 각각 나타낸 것을 나타낸다.



(a) PSR 자기상관 (b) PSR상호상관

그림 1. PSR의 (a)자기상관과 (b)상호상관

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 2는 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.

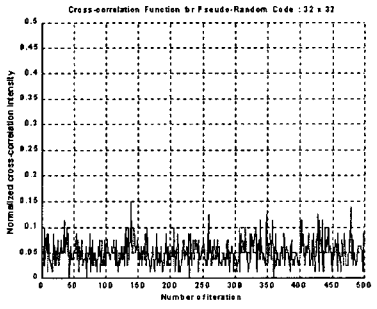


그림 2. PSR을 500번 상호상관시킨 결과

표 1은 앞에서 언급한 네 가지 방법에 의해 생성된 32×32의 크기를 갖는 위상코드를 이용하여 500번의 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차값을 비교하여 나타낸 것이다.

표 1. 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차

상호상관	Phase Codes (32 × 32)			
	PR	RE	HM	PSR
평균값	0.148	0.13	0.139	0.067
표준편차	0.0188	0.0128	0.0215	0.0113
어드레스 갯수	2.77×10^{71}	7.96×10^{24}	4.29×10^{9}	1.85×10^{19}

표 1에서 나타나듯이 PSR에 의한 상호상관 결과가 다른 방법들에 비하여 평균값이 거의 두 배정도 낮게 나타났으며, 상호상관값의 변화정도를 측정할 수 있는 표준편차값도 가장 낮은 값을 갖기 때문에 거의 일정한 상호상관값을 갖음을 알 수 있다.

그림 3은 픽셀크기가 32×32인 500개의 어드레스를 이용한 네 가지 위상코드들에 대한 SNR을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 PSR이 다른 위상코드들에 비하여 SNR이 약 1.5배 정도 높게 나타남을 알 수 있다.

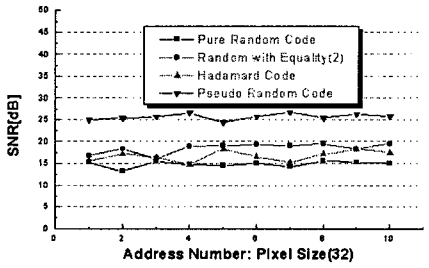


그림 3. 위상코드 방법에 따른 SNR

결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상코드 다중화에 사용될 가장 최적의 위상코드를 구현하기 위해 기존에 위상코드 다중화에 많이 사용되고 있는 HM을 비롯하여 PR, ER 및 PSR에 대한 상호상관값과 어드레스 갯수를 비교 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 각각의 방법들은 실제적인 광시스템에서 위상코드를 표현하는 SLM의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 의도적으로 ±10%의 오차를 갖는 에러값을 부과하여 시뮬레이션을 하였으며 사용된 샘플은 각각 프로그램적으로 생성된 501개의 위상코드 어드레스를 사용하였다. 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. 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.

※본 연구과제는 한국과학재단의 특정기초연구(KOSEF(특정)93-0100-0101-3)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

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

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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/B, 1999

[5] 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

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