

# 공간적 빔 세기 불 균일성을 가지는 디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 수정된 패리티 코딩

최안식<sup>†</sup> · 전영식 · 백운식

경희대학교 전자정보학부

Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

(2002년 10월 17일 받음, 2003년 3월 14일 수정본 받음)

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장시스템에서 발생하는 공간적 빔 세기의 불 균일성 때문에 발생하는 에러를 줄이기 위한 수정된 패리티 코딩기법들을 소개한다. 일반적인 패리티 코딩과 수정된 패리티 코딩 기법들에 대한 인코딩과 디코딩 방법에 대해 설명하였으며, 실험결과로부터 패리티 코딩과 수정된 패리티 코딩기법들의 bit-error-rate(BER) 성능을 비교하였다.

주제어 : holographic memory, modulation codes, parity codes, error correction codes.

## I. 서 론

블룸 홀로그래픽 데이터 저장 시스템(holographic data storage system : HDSS)은 높은 저장 용량, 빠른 전달속도 그리고 짧은 접근시간을 동시에 달성할 수 있는 저장 시스템이다.<sup>[1-5]</sup>

HDSS에서는 데이터가 2차원의 페이지 형태로 저장·복원된다. 이 과정에서 2차원 페이지의 빔 세기 불균일 분포로 인하여 HDSS로부터 복원된 영상의 이진판별과정(binary-decision processing)에서 효율적인 임계치(thresholding)를 선택하는데 많은 어려움이 있다. 전역적(global) 임계치 설정과 같은 방법은 많은 에러들을 유발시킬 수 있으므로 지역적(local) 임계치 설정이 가능한 코딩기법들이 연구되어지고 있다.<sup>[2-5]</sup> 2차원 페이지에 입력되는 데이터에 대해서 지역적 임계치 설정이 가능하도록 하는 코딩기법에는 각 코드 블록에 대해서 0과 1의 수를 같게 하는 balanced modulation 코딩기법들과 데이터 비트들에 포함된 1의 수에 해당하는 패리티 비트들이 데이터 비트들에 첨가되어 하나의 코드 블록을 형성함으로써 높은 코드율을 가지는 패리티(parity) 코딩기법 등이 있다.<sup>[2-5]</sup>

본 논문에서는 지역적 임계치 설정이 가능하고 높은 코드율을 가지는 패리티 코딩기법과 이를 수정한 코딩기법들을 HDSS에 적용하여 BER 성능을 조사하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 패리티 코딩기법과 3가지의 수정된(modified) 패리티 코딩기법에 대해 설명하고, 3장에서는 각 패리티 코딩기법을 도입한 실험결과 및 토의 그리고 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

## II. 패리티 코딩 기법과 수정된 패리티 코딩 기법

### 2.1. 패리티 코딩 기법

패리티 코딩기법의 장점은 데이터 블록 크기의 변화가 가능

하므로 코드율이 가변적이라는 점과 코드율을 0.9 이상으로 달성할 수 있다는 점 그리고 인코딩 및 디코딩과정이 간단하다는 장점이 있다.<sup>[6]</sup> 이 기법의 인코딩과정은 같은 크기의 데이터 비트들에 포함된 1의 수에 해당하는 패리티 비트들이 데이터 비트들에 첨가되어 하나의 코드 블록을 형성한다. 또한 검출과정의 신뢰성을 높이기 위해서 패리티 정보는 1:2(differential) 코드로 인코딩을 하게된다.<sup>[6]</sup> 1:2 코드의 인코딩 방법은 1비트를 2비트로 인코딩을 수행하는 방법이다. 즉 비트 값이 1이면 10으로 그리고 비트 값이 0이면 01로 인코딩 되며, 디코딩 과정에서는 복원된 데이터를 두 비트씩 읽어들이며 첫 번째 비트와 두 번째 비트의 차이 값을 계산하여, 첫 번째 비트의 값이 크면 1로 두 번째 비트 값이 크면 0으로 디코딩을 수행하게 된다. 그림 1에는 일반적인 패리티 인코딩 방법을 나타내었다. 디코딩과정에서는 검출된 코드 블록의 패리티 정보로부터 데이터 블록에 포함된 1의 수를 계산하고, 데이터 블록을 정렬(sort) 알고리즘을 이용하여 그레이레벨 값 크기 순서대로 정렬한 다음 패리티 정보로부터 얻어진 1의 수만큼 즉, 그림 1에서보면 패리티 정보로부터 얻어진 1의 수는 35가 된다. 그러므로 크기순서로 정렬된 데이터 블록 중 35번째 값을 임계

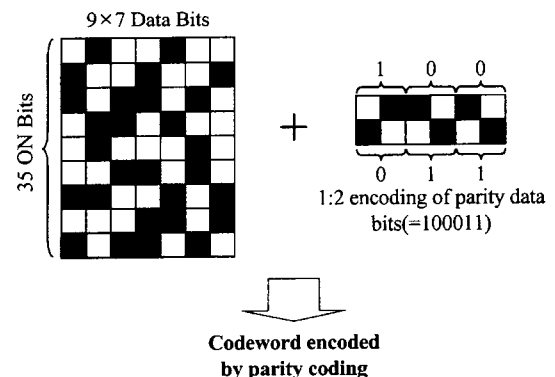


그림 1. 패리티 인코딩 방법.

<sup>†</sup>E-mail: ansik@cvs2.khu.ac.kr

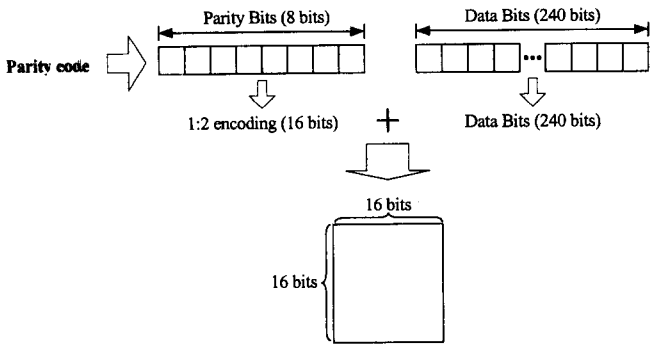


그림 2. 패리티 인코딩 블록도.

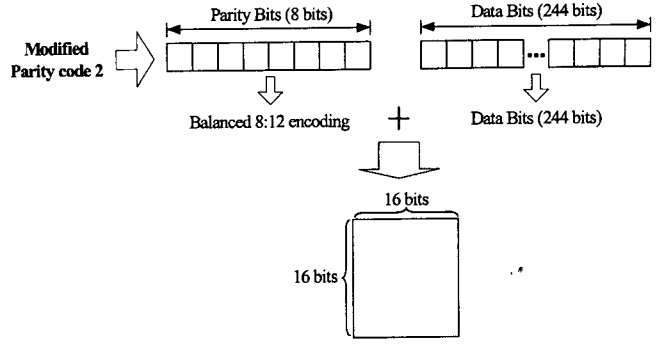


그림 4. 수정된 패리티 코드 2의 인코딩 블록도.

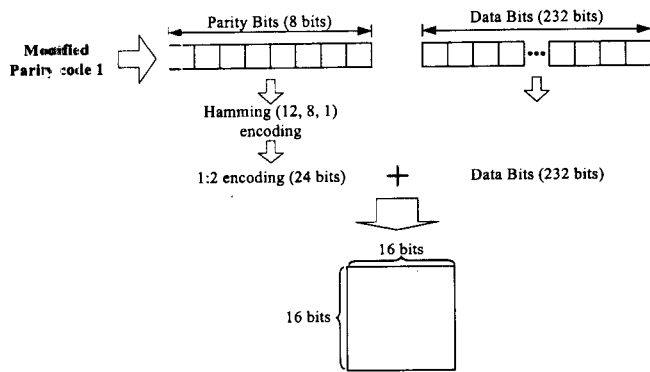


그림 3. 수정된 패리티 코드 1의 인코딩 블록도.

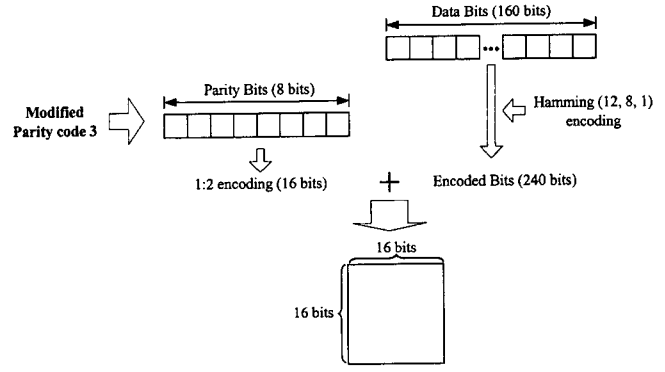


그림 5. 수정된 패리티 코드 3의 인코딩 블록도.

표 1. 패리티 코드의 코드율 비교

패리티 코드 종류	코드율
1. 일반 패리티 코드	$240/256 \approx 0.94$
2. 수정된 패리티 코드 1	$232/256 \approx 0.91$
3. 수정된 패리티 코드 2	$244/256 \approx 0.95$
4. 수정된 패리티 코드 3	$160/256 \approx 0.625$

치로 설정하여 이 값보다 크거나 같으면 1로 결정되고 나머지는 0으로 결정하는 방법이다.

실제 실험에 적용하기 위한 패리티 인코딩된 데이터는 코드 블록을 256 비트로 구성되게 하였으며, 256 비트를 가지는 각 코드 블록에 대해 2차원 16×16 비트로 재구성하여 전체 페이지 크기를 192×192 비트로 구성하였다. 256 비트를 가지는 각 코드 블록에 대해 2차원 16×16 비트로 재구성한 이유는 각 코드 블록에 대해 HDSS로부터 복원된 영상에 대한 공간적 빔 세기의 균일성을 유지하고자 하였다. 이와같이 구성된 패리티 코드의 인코딩 블록도를 그림 2에 나타내었다.

### 2.2. 수정된 패리티 코딩 기법

본 연구에서는 0.9 이상의 코드율을 달성하면서 드문 경우이긴 하나 패리티 비트의 에러 때문에 발생될 수 있는 데이터 비트들의 연접 에러의 가능성을 줄이고, 코드율을 높이기 위한 방법과 Hamming(12, 8, 1)<sup>[6]</sup> 비트 에러 정정 코딩기법을 조합한 코드를 사용함으로써 에러 정정 능력을 추가하는 방법도 제안한다.

#### ㉠ 수정된 패리티 코드 1

이 코딩 방법은 드문 경우이긴 하나 패리티 비트들에 발생되는 에러 때문에 야기되는 데이터 비트들의 연접 에러 가능성을 줄이고자 제안한 패리티 코딩 기법이다. 즉, 패리티 정보의 인코딩 과정에서 패리티 8비트를 먼저 Hamming(12, 8, 1) 인코딩을 한 후 이를 다시 1:2 인코딩한 경우이다. 수정된 패리티 코드 1의 인코딩 블록도를 그림 3에 나타내었다.

#### ㉡ 수정된 패리티 코드 2

이 코딩 방법은 가장 큰 코드율을 가지는 경우이다. 즉, 패리티 정보의 인코딩 과정에서 패리티 8비트를 balanced 8:12 인코딩<sup>[7]</sup>을 수행하였으며, 패리티 정보의 balanced 8:12 디코딩은 정렬 알고리즘을 이용하여 1과 0을 구분한 후 8:12 디코딩을 수행하였다. 수정된 패리티 코드 2의 인코딩 블록도를 그림 4에 나타내었다.

#### ㉢ 수정된 패리티 코드 3

이 코딩 방법은 데이터 비트들의 에러 정정을 위하여 먼저 데이터 비트들을 Hamming(12, 8, 1) 인코딩 한 후 지역적 임계값 적용이 가능하도록 다시 일반 패리티 인코딩 방법을 적용하여 하나의 코드 블록을 형성하였다. 수정된 패리티 코드 3의 인코딩 블록도를 그림 5에 나타내었으며, 표 1에는 각 패리티 코드들의 코드율을 비교하였다.

## III. 실험 결과 및 토의

본 실험에서 사용한 광원은 Coherent사의 출력이 100 mW인 Diode-pumped Nd:YAG 레이저( $\lambda = 532 \text{ nm}$ )이며, 레이저로부

터 나온 빔은 빔 확대기(beam expander)에 의해 일차적으로 확대된다. 이 확대된 빔은 빔 분할기(beam splitter)에 의해 신호빔(object beam)과 기준빔(reference beam)으로 나뉘어져 광굴절 저장매체에 직각으로 입사된다. 신호빔 쪽으로 분주된 빔은 공간 필터(spatial filter)와 렌즈(lens)를 이용해 다시 확대함으로서, SLM(spatial light modulator)에 입사하는 빔의 광분포를 비교적 균일하게 하였다. 시스템에서 데이터 입력으로서 사용한 SLM은 CRL사의 투과형 SLM(1024×768 pixels, 픽셀 피치 36μm)을 사용하였으며, 이 SLM의 대조비(contrast ratio)는 100:1이고, 영상 출력은 EG&G사의 CCD(charge coupled device:1008×1018 pixels, 픽셀 피치 9μm) 디지털 카메라(8비트 해상도)로 측정하였다. 본 실험의 홀로그래픽 저장 시스템은 푸리에 변환(Fourier transform:FT) 렌즈를 사용하여 푸리에 홀로그램이 기록되도록 하는 4-f(4-focal length) 구조를 사용하였으며, 4-f 구조에서 SLM의 픽셀들을 CCD 픽셀에 1대 1 매칭시키기 위해 동일한 초점 거리를 갖는 두 개의 렌즈를 사용하였다. 즉, SLM 픽셀 하나에 CCD 픽셀 16개 픽셀(4×4 픽셀)이 맵핑되게 되므로 실제 사용 가능한 SLM 픽셀수는 252×254 픽셀이다. 1대 1 매칭을 위해 사용한 렌즈는 Newport사의 Triplet 렌즈이며 초점거리는 125 mm이고 렌즈의 구경은 38 mm를 사용하였으며, 실험에서 사용된 저장물질은 Deltronics사의 Fe가 0.03 mole% 도핑된 체적 1 cm<sup>3</sup> 크기의 LiNbO<sub>3</sub> 광굴절 결정을 사용하였다. 홀로그래픽 데이터 저장 시스템의 저장 밀도를 높이기 위해 푸리에면에 aperture를 사용하게 되는데 본 실험구성에서는 2배의 Nyquist aperture(≒1.85 mm)<sup>4)</sup>를 사용하였고, 전자 셔터(shutter)를 이용하여 모든 페이지에 대한 기록시간을 12초로 고정하였으며, 데이터 기록 실험 시 다중화는 갈바노 스캐너(Galvanometric scanner)를 이용하여 0.02°의 각도로 다중화 하였다. 그림 6은 홀로그래픽 데이터 저장 시스템의 실험 구성도이다.

표 1의 패리티 코드들의 BER 성능을 평가하기 위해 그림 6의 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 사용하여 각 코드별로 기록/복원된 20개의 데이터 페이지(총 80 페이지)를 이용하여 평가하였으며, 본 실험에서는 SLM과 CCD 사이의 1:4 관계가 있으므로 CCD 출력영상의 4×4 픽셀 중 한 픽셀을 샘플링하여 패리티 디코딩 과정을 수행하였다. 그림 7은 SLM에 입력 영상인 일반 패리티 인코딩된 영상과 HDSS로부터 복원

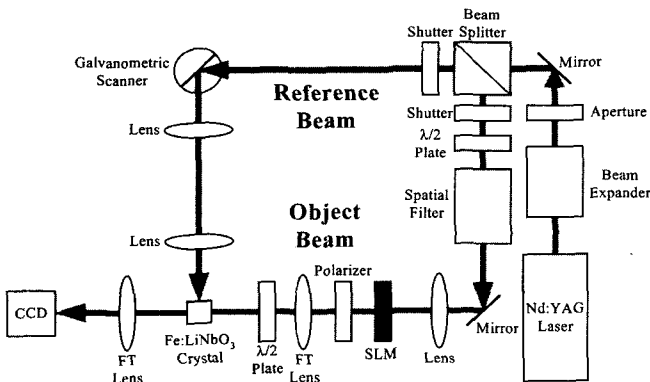
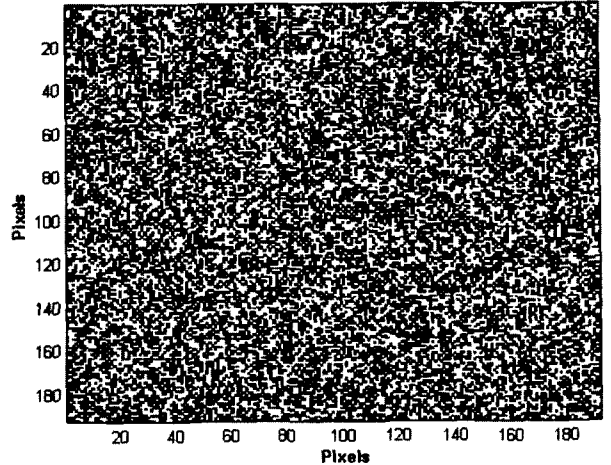
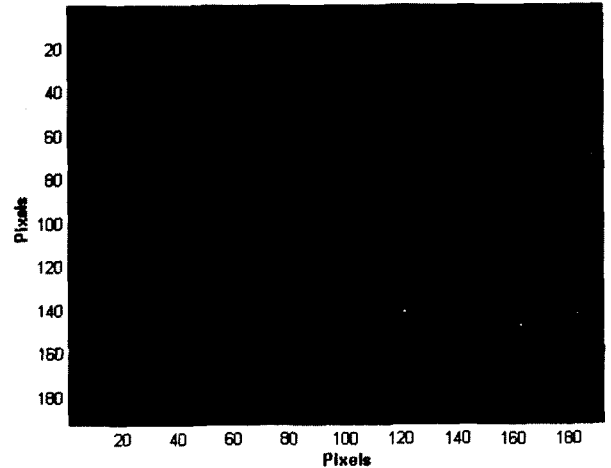


그림 6. 홀로그래픽 데이터 저장 시스템의 실험 구성도.



(a) 패리티 인코딩된 영상



(b) HDSS로부터 복원된 패리티 인코딩된 영상

그림 7. SLM 입력 영상과 HDSS로부터 복원된 영상.

된 영상을 나타내었다.

실험결과를 각 패리티 코드별로 디코딩 전과 후의 BER 성능을 조사하였으며, SNR(signal-to-noise ratio)은 각 패리티 코드의 디코딩 전 가장 낮은 BER을 나타낼 때 임계치로 측정하였다.<sup>[8]</sup>

그림 8, 9, 10, 11는 각 패리티 코드별 SNR에 대한 디코

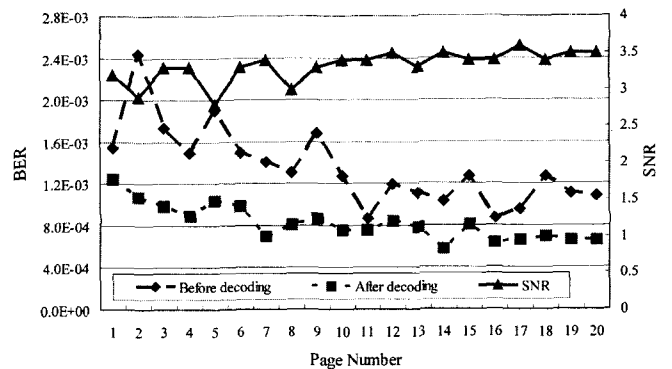


그림 8. 패리티 코드에 대한 SNR-BER 분포.

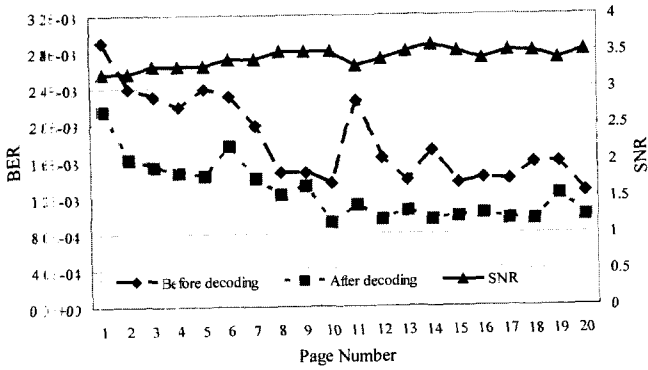


그림 9. 수정된 패리티 코드 1에 대한 SNR-BER 분포.

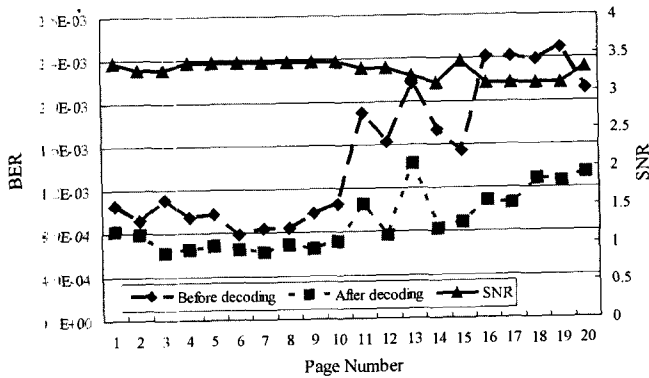


그림 10. 수정된 패리티 코드 2에 대한 SNR-BER 분포.

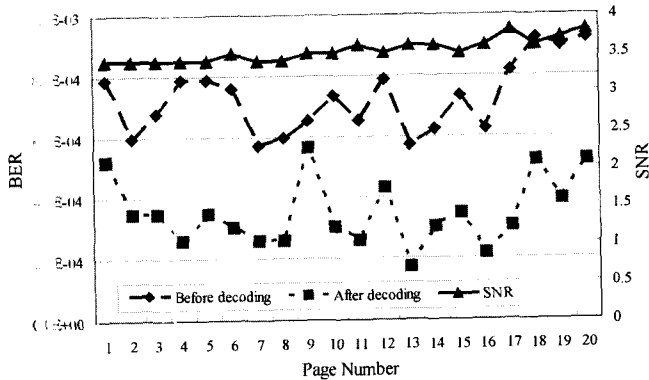


그림 11. 수정된 패리티 코드 3에 대한 SNR-BER 분포.

표 2. 실험결과 전체 페이지에 발생된 에러 수

패리티 코드 종류	디코딩 전 에러 수	디코딩 후 에러 수	개선율
1. 패리티 코드	997	568	≍ 43%
2. 수정된 패리티 코드 1	1337	837	≍ 37%
3. 수정된 패리티 코드 2	1118	628	≍ 44%
4. 수정된 패리티 코드 3	534	161	≍ 70%

딩 전과 후의 BER 분포를 나타낸 그래프이며, 표 2에는 각 패리티 코드별 전체 페이지에 발생된 디코딩 전과 후의 에러 수와 디코딩 후의 에러 개선율을 나타내었다.

그림 8, 9, 10, 11과 표 2로부터 패리티 코드에 대해 수정

된 패리티 코드 2는 거의 대등한 BER 성능을 가짐을 알 수 있었으며, 수정된 패리티 코드 3의 경우에는 코드율이 낮은 반면에 데이터 비트들을 여러 정정 기능이 있는 Hamming(12, 8, 1) 코드로 인코딩을 하였기 때문에 비트 여러 정정 능력에서 뛰어났으며, BER 성능이 가장 좋음을 확인할 수 있었다. 그러나 수정된 패리티 코드 1은 HDSS로부터 복원된 데이터 페이지들의 SNR 값이 패리티 코드와 수정된 패리티 코드 2의 값과 유사하여 BER 성능이 대등할 것으로 판단되었으나 BER 성능이 패리티 코드와 수정된 패리티 코드 2에 비해 상대적으로 낮게 확인되었다. 이 결과는 수정된 패리티 코드 1의 코드 자체의 특징과 빔 세기의 불 균일성에 의한 요인보다는 기록/복원의 반복과정에 의한 실험적 오차와 저장매질에 의해 야기되어진 결과로 판단된다. 또한 패리티 코드와 수정된 패리티 코드 1, 2, 3 모두 패리티 비트의 에러는 발생하지 않았기 때문에 우려했던 데이터 비트의 연접 에러는 발생되지 않았다. 이 점을 고려하면 수정된 패리티 코드 2가 BER과 코드율면을 동시에 고려한다면 가장 우수한 코드로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 HDSS에서 2차원 페이지의 빔 세기의 불 균일성으로 인하여 복원된 영상의 이진판별과정에서 효율적인 데이터 검출을 위해 지역적 임계치 설정이 가능한 패리티 코딩기법과 수정된 패리티 코딩기법들의 인코딩과 디코딩 방법을 살펴보았다. 수정된 패리티 코딩기법에서는 코드율을 최대 95%를 달성할 수 있으므로 데이터 저장 측면에서는 큰 이점이 있을 것으로 판단되어진다. 실험결과로부터 각 패리티 코드 별 디코딩 전의 평균 BER은 패리티 코드가 약  $1.4 \times 10^{-3}$ , 수정된 패리티 코드 1이 약  $1.8 \times 10^{-3}$ , 수정된 패리티 코드 2가 약  $1.5 \times 10^{-3}$ , 수정된 패리티 코드 3이 약  $7.2 \times 10^{-4}$ 로 측정되었으며, 디코딩 후의 평균 BER은 패리티 코드가 약  $8.2 \times 10^{-4}$ , 수정된 패리티 코드 1이 약  $1.3 \times 10^{-3}$ , 수정된 패리티 코드 2가 약  $8.9 \times 10^{-4}$ , 수정된 패리티 코드 3이 약  $3.5 \times 10^{-4}$ 로 측정되었다. 본 논문에서 살펴본 패리티 코딩기법들은 HDSS에서의 데이터 검출과정에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부주관 '99 산업기반기술개발사업 중 차세대 대용량 정보저장장치개발사업의 부분적인 결과임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

[1] D. Psaltis and G. W. Burr, "Holographic data storage," *Computer*, vol. 32, pp. 52-60 (1998).  
 [2] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson and B. Marcus, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 639-641 (1997).

- [3] G. W. Burr, W. C. Chou, M. A. Neifeld, H. Coufal, J. A. Hoffnagle and C. M. Jefferson, "Experimental evaluation of user capacity in holographic data storage systems," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 5431-5443 (1998).
- [4] G. W. Burr and B. Marcus, "Coding tradeoffs for high-density holographic data storage," *SPIE*, vol. 3802, pp. 18-29 (1999).
- [5] V. Vadde and B. V. K. Vijaya Kumar, "Parity coding for page-oriented optical memories with interpage intrapage intensity variations," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 546-548 (1999).
- [6] S. Lin and D. J. Costello, Jr., *Error Control Coding: Fundamentals and Applications* (Prentice-Hall, 1983) Chapter 3, 6.
- [7] L. G. Tallini, R. M. Capocelli and B. Bose, "Design of some new efficient balanced codes," *IEEE. Trans. on Inform. Theory*, vol. 42, pp. 790-802 (1996).
- [8] X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1913-1915 (1995).

### **Modified parity coding for digital holographic data storage system with spatial beam intensity variations**

An Sik Choi<sup>†</sup>, Young Sik Jun and Woon Sik Baek

*School of Electronics and Informations, KyungHee University, Yongin-si, Kyunggi-do 449-701, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: ansik@cvs2.khu.ac.kr*

(Received October 17, 2002, Revised manuscript March 14, 2003)

In this paper, we introduce modified parity coding methods to reduce the errors caused by spatial beam intensity variations in a holographic data storage system. We explained the encoding and decoding process of the conventional parity coding and the modified parity coding techniques. We compared the bit-error-rate (BER) performances of the conventional parity coding and the modified parity coding techniques from experimental evaluation.

OCIS Code : 210.468.