

論文99-36D-11-9

# 홀로그래픽 광메모리에서 이진 영상 처리를 이용한 컬러 영상 기록 및 복원

## (Recording and Retrieving a Color Image Using Binary Image Processing in Holographic Optical Memory)

金正淮\*, 安俊遠\*, 金男\*, 李權淵\*\*

(Jung Hoi Kim, Jun Won An, Nam Kim, and Kwon Yeon Lee)

### 요 약

본 논문에서는 새로운 직접 접근 방법과 이진 영상처리를 통해 컬러 영상을 저장하고 재생할 수 있는 디지털 홀로그래픽 정보 저장 시스템을 구현하였다. 직접 접근 방법을 통해 영상 처리를 수행한 결과, raw 파일을 이용하여 영상처리를 수행하는 것보다 광메모리에 저장되는 페이지 수를 줄일 수 있었으며, 압축된 128×80×256(6.6KB)해상도의 컬러 영상을 재생할 수 있었다. 또한 문자 파일이나 동영상 파일등과 같이 파일의 종류에 관계없이 입력 데이터가 디지털 홀로그램으로 변환될 수 있음을 보여주었다.

### Abstract

In this paper, digital holographic data storage system is implemented to record and retrieve the color images using new direct access method and binary image processing. As a result of applying image processing via a proposed direct access method, we can reduce the number of data page than binary image processing using raw file and replay color image of resolution of 128×80×256(6.6KB). Also, it is showed that the input data can be transformed into digital holograms regardless of any kinds of file such as character data, moving picture, etc.

### I. 서 론

최근 차세대 저장 매체로서 홀로그래픽 기술과 광굴절 효과(photorefractive effect)에 바탕을 둔 광 메모리에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광 메모리는 신호빔과 기준빔을 기록 매질 내에 결합시킴으로서 광굴절 효과에 의한 매질의 굴절률 변화에 정보를 저장하

고, 정보의 판독은 기록시와 동일한 기준빔만을 이용하므로 구조가 간단하다. 기존의 저장 매체가 물리적인 공간을 할당하여 정보를 저장하는 반면, 광메모리는 파장, 각도, 위상 등을 이용, 동일한 장소에 정보를 중첩시키므로 고밀도 정보저장이 가능하다. 또한 전기적인 빔 편향이 가능한 AOD(acousto optic deflector)를 통해 빠른 접근 속도를 얻을 수 있으며, 비트 단위가 아닌 페이지 단위로 정보를 재생하므로 병렬 처리(parallel processing) 및 높은 전송속도를 가진다.<sup>[1, 2]</sup>

광 메모리에 관한 연구는 1963년 Polaroid사의 Van Heerden에 의해 처음으로 제시되었지만, 광소자 및 광정보 처리 기술의 난제와 전자산업의 비약적인 발전에 밀려 많은 연구에도 불구하고 상대적인 경쟁력을 상실하게 되었다. 최근 멀티미디어 정보화 사회의 새로운

\* 正會員, 忠北大學校 情報通信工學科

(Dept. of Computer &amp; communication Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

\*\* 正會員, 順天大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Suncheon Nat'l Univ.)

接受日字: 1999年3月23日, 수정완료일: 1999年10月13日

메모리 시스템에 대한 필요성과 광굴절 결정, 포토 폴리머 등과 같은 새로운 기록매체, 그리고 공간 광변조기(spatial light modulator:SLM), AOD, CCD Array등의 광학소자 기술에 힘입어, 1991년 Northrop사의 F. Mok 박사가  $Fe:LiNbO_3$ 에 500개의 아날로그 영상을 저장함으로써 광메모리에 대한 연구가 새롭게 시작되었다.<sup>[3]</sup>

디지털 광메모리는 1993년에 Caltech의 D. Psaltis 교수에 의해 시작되었으며, 그는 160×110 비트로 구성된 10,000 페이지의 디지털 홀로그래픽 데이터를 기록하여 여러 없이 복원함으로써 컴퓨터의 저장장치로 사용될 수 있음을 보여주었다.<sup>[4]</sup> 이 후 Standford 대학의 L. Hesselink 교수팀은 1994년에 압축된 디지털 영상과 비디오 데이터를 기록·재생하였으며 Optitek이라는 회사를 설립하여 200Mb의 저장용량, 3~4ms의 검색 시간과 1.5Mb/sec의 전송속도를 갖는 Gerome라는 시제품을 제작하였다.<sup>[5]</sup> 1995년에는 Rockwell의 J. Hong 박사팀이 전기적인 주소지정이 가능한 AOD를 사용하여 메모리 시스템을 설계 1GB의 정보를 공간 및 각도 다중화를 통해 저장하였다.<sup>[6]</sup>

또한 외국에서는 홀로그램 정보저장 시스템(hologram data storage system : HDSS) 및 광굴절 정보저장 매질(photorefractive information storage materials : PRISM) 개발 컨소시엄을 통해 1Tbit 저장용량, 1ms의 접근 속도 및 1Gbit/s의 처리속도를 갖는 시스템 개발을 추진하고 있으며 1996년에는 이 프로젝트의 일환으로 5.75Mbyte(MPEG) 저장용량을 갖는 DEMON(digital holographic demonstrator)이 개발된바 있다.<sup>[7]</sup>

반면에 국내 광메모리의 실정은 1997년 초부터 충북대, 순천대, 광운대, 서울대, 경희대, 부경대, 영남대 등 몇몇 대학을 중심으로 기초 실험과 기본적인 응용실험이 시작되었지만, 전체적인 시스템은 구현되지 못했다.[8-12] 산업체에서는 삼성, 대우, LG 등의 대기업을 중심으로 광메모리에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 Fe가 0.015wt.% 도핑된  $LiNbO_3$  광굴절 결정을 이용하여 컬러 영상을 복원할 수 있는 디지털 광 메모리 시스템을 설계하였다. 기존의 영상처리를 사용하면서도 파일의 종류에 상관없이 데이터를 입력 받기 위해 하드 디스크상에 저장된 이진 데이터를 직접 다루었으며, 여러 검출 및 정정을 위해 Reed-Solomon 코딩(RS)을 적용하였다. 출력 영상으로 부터 이진 데이터의 추출은 재생된 디지털 홀로그램의 특성을 분석하

여 임계 처리를 수행하였다.

## II. 디지털 홀로그래픽 정보저장 시스템

디지털 홀로그래픽 정보저장 시스템(digital holographic data storage system)은 그림 1과 같이 데이터 입력력 및 주소 지정을 위한 전자 제어부분과 홀로그램을 저장하기 위한 광학 시스템으로 구성할 수 있다. 광학 시스템은 아날로그 방식과 동일한 방법으로 정보를 저장하고 재생한다. 두 방식의 차이점은 아날로그 방식이 SLM을 통해 영상을 직접 입력하는 반면에, 디지털 방식은 이진 데이터로 코딩된 영상을 다룬다. 디지털 방식은 아날로그 방식이 갖는 대용량, 빠른 접근 속도, 병렬처리의 속성을 지니면서, 두 가지 형태의 정보만을 저장함으로써 잡음에 강하다는 장점을 가지고 있다. 또한 그림 1과 같이 전자적인 제어를 통해 입력 데이터에 여러 가지 신호 처리를 가할 수 있다. 메모리 환경에 따라 다양한 형태의 코딩 기술을 적용할 수 있으며, 기존의 영상처리 기술을 이용하여 입력력 데이터를 처리할 수 있다.

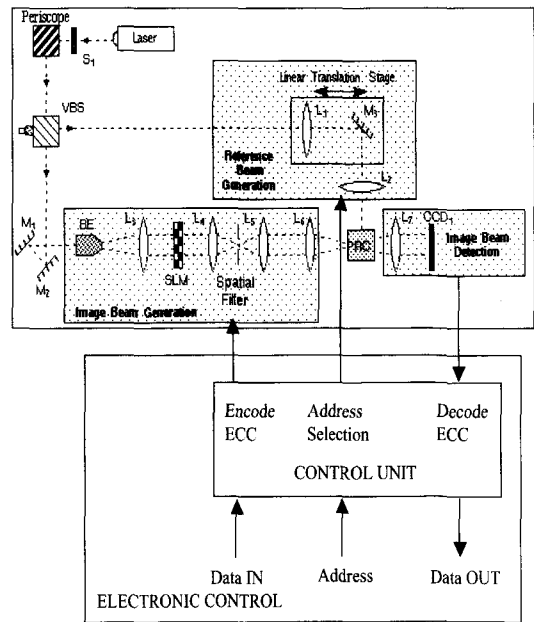


그림 1. 디지털 홀로그램을 위한 광메모리 시스템  
Fig. 1. Optical memory system for digital hologram.

전형적인 디지털 광메모리 시스템의 입력과정은 그림 2와 같다. 정보 형태는 사각형 격자 모양을 사용하

며, 정보는 사각형 격자의 그레이 값에 저장된다. 격자가 표현할 수 있는 비트 수는 사용되는 그레이 레벨에 따라 달라진다. 다단계의 그레이 레벨을 사용할 경우 격자가 표현하는 정보가 늘어나지만, 잡음에 매우 약해 지므로 일반적으로 그림 2와 같이 '0'과 '255'의 두 그레이 레벨을 사용하며, 격자 한 개가 하나의 비트를 표현한다. 전기 신호는 격자의 그레이 값에 따라 SLM의 픽셀을 'on', 'off' 시키게 되고, 디지털 정보는 SLM을 통과한 신호빔에 의해 광신호로 변조된다. 변조된 각각의 페이지는 주소 지정을 위한 기준빔과 간섭을 일으킴으로서 광물질 결정에 저장된다. 대표적인 주소 지정 방법은 브래그 조건의 파장선택성과 각도 선택성을 이용한 파장 다중화 방법과 각도 다중화 방법이 있으며, 직교 특성을 갖는 랜덤 위상코드를 발생하는 위상코드 다중화 방법도 있다.

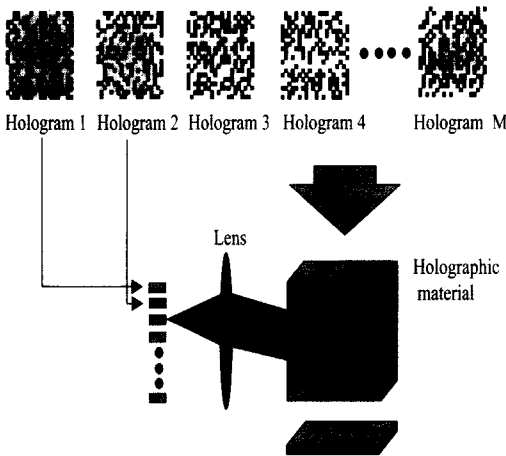


그림 2. 디지털 홀로그램 저장 과정  
Fig. 2. Digital hologram recording process.

각도 다중화는 입력신호에 따라 기준빔의 입사 각도만을 변화시킴으로 구조가 간단하여 가장 많이 사용되는 다중화 방식이다. 각도 선택성은 결정의 두께가 두꺼울수록 예민해지기 때문에 기준빔의 각도를 조절하거나 결정을 정밀하게 회전시키는 장치가 필요하다. 빔 편향은 제어와 구성이 용이하지만 기계적인 움직임을 수반하는 모터에 의한 제어와 초음파를 이용하여 정밀한 각도를 편향하는 AOD에 의한 방법이 있다. 기록 가능한 두 사이각이 주어졌을 때 각도 다중화 될 수 있는 개수는 식 (1)으로 구할 수 있다.<sup>[6]</sup>

$$M \approx 1 + \frac{nL}{\lambda} |\cos \theta_1 - \cos \theta_2| \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 광원의 파장,  $n$ 과  $L$ 은 각각 매질의 굴절률과 두께를 나타낸다. 한 예로  $L = 1\text{ cm}$ ,  $n = 2.2$ ,  $\lambda = 0.5\ \mu\text{m}$ ,  $\theta_1 = 92^\circ$ ,  $\theta_2 = 88^\circ$ 일 경우 근사적인 다중화 개수는 약 3,000개 정도가 가능하다.

또한 균일한 회절 효율을 갖는 홀로그램을 얻기 위해서 노출시간 계획(exposure time schedule)이 적용되는데, 노출 시간 계획에서 중요한 상수는 기록 시간 상수(recording time constant)와 지움 시간 상수(erasing time constant)이다. 두 시간 상수가 대칭일 경우 식 (2)가, 비대칭일 경우는 식 (3)이 사용된다.<sup>[13]</sup>

$$t_m = r \ln \left[ \frac{1 + (m-1)\kappa}{1 + (m-2)\kappa} \right], \quad (2)$$

여기서

$$\kappa = 1 - \exp(-t_1/\tau) < 1$$

$$t_m = -\tau_r \left\{ 1 - \exp(-t_{m+1}/\tau_e) + \exp \left[ t_{m+1} \left( \frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_r} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

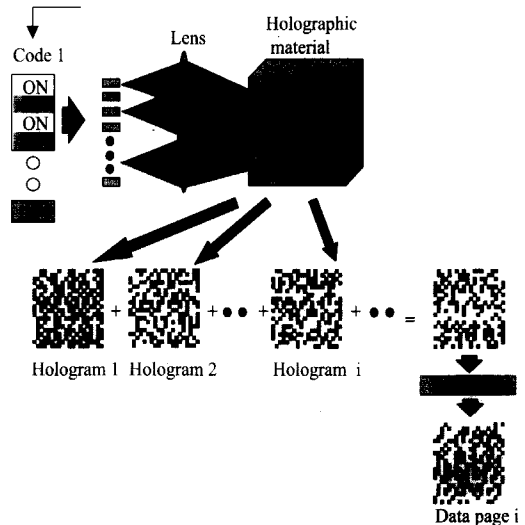


그림 3. 디지털 홀로그램 재생  
Fig. 3. Reconstruction of Digital hologram.

저장된 홀로그램은 기록시와 동일한 주소지정 방법

을 통해 기준빔만을 조사함으로써 재생된다. 출력 영상은 CCD을 통해 얻어지며, 디지털 홀로그램은 그림 3과 같이 이날로그 홀로그램과 달리 디지털 데이터를 추출하기 위해 이진 영상처리인 임계 처리가 적용된다. 임계처리에서 발생하는 raw BER을 줄이기 위해서는 재생된 각 페이지들간의 회절 효율이 균일해야 되며, 픽셀간의 경계가 뚜렷해야 된다. 실제로 raw BER을  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$  정도를 얻기는 매우 어려울 뿐만 아니라 상용 메모리의 경우  $10^{-12}$ 를 요구하기 때문에 임계처리 후에 더 정정을 위한 디코딩 과정을 수행한다. 코딩의 적용은 광메모리 환경에 따라 해밍코드, 리드 솔로몬 코드등과 같은 다양한 코딩 방법들이 광메모리에 변형되어 사용되어지고 있다. 이와 같이 디지털 광메모리는 기존의 영상처리나 코딩 체계를 이용할 수 있고, 이진 데이터를 다루기 때문에 컴퓨터와 호환성이 우수하다는 장점을 가지고 있다.

### III. 제안된 입출력 시스템

#### 1. 직접 접근 방법을 이용한 입력 처리

영상처리는 입력 장치로부터 생성된 영상을 변화, 재가공, 정보 추출 등을 수행하는 과정으로 영상 조작, 영상 분석, 영상 인식, 그리고 영상 통신 분야 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 이러한 영상 처리를 이용해 영상 데이터 뿐만 아니라 다양한 종류의 입력데이터를 저장할 수 있는 광메모리 시스템을 설계하였다. 일반적으로 영상 프로그램은 그림 4와 같이 하드디스크 상에 압축되어 있는 영상 파일만을 읽어와 raw파일로 변환한 다음 기하학적인 변형을 수행한다. Raw 파일은 순수한 데이터만을 가지고 있는 영상파일로 데이터 처리에는 용이하지만 용량이 너무 크다는 단점이 있다.

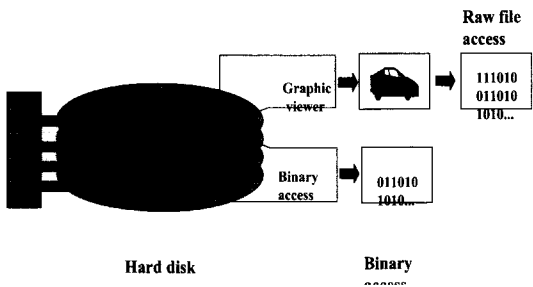


그림 4. 이진 데이터 발생  
Fig. 4. Binary data generation.

Raw 파일로 부터 이진 데이터를 추출하여 저장하게 되면 여러 페이지의 홀로그램을 기록해야 되고 컬러 영상일 경우 더욱 더 데이터가 늘어나게 된다. 본 논문에서는 영상 프로그램을 통해 데이터에 접근하지 않고 그림 4와 같이 하드디스크 상에 저장된 이진 데이터에 직접 접근하여 영상처리를 수행하였다. 따라서 그레이

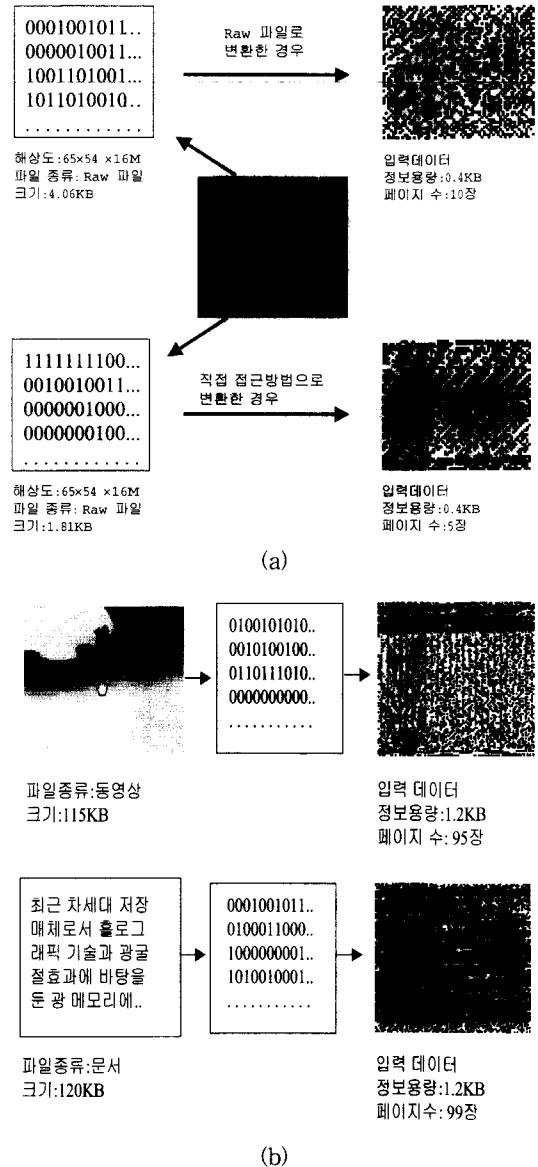


그림 5. 직접 접근 방법에 의한 입력 데이터 변환  
(a) 입력데이터 비교  
(b) 파일종류에 따른 데이터 변환  
Fig. 5. Input data transform by direct access method.  
(a) comparison of input data.  
(b) data transform due to the kinds of file.

영상이나, 컬러 영상 또는 압축된 영상에 상관없이 디지털 홀로그램으로 변환이 가능하며, 문서 파일이나 동영상 파일등도 광메모리에 저장할 수 있다.

두 방법에 대한 차이점을 알아보기 위해, 그림 5(a)와 같은 영상을 이용하여 디지털 홀로그램으로 변환시켜 보았다. 프로그램은 Adobe사의 포토샵을 이용하여 raw 파일을 만들었을 경우 디지털 입력 데이터로 총 10페이지를 제작해야 되지만, jpg로 압축된 파일을 직접 접근하여 이진데이터로 만들 경우 5장으로 줄어 들었음을 알 수 있다. 또한 그림 5(b)에서는 파일의 종류에 상관없이 디지털 홀로그램으로 변환하여 다시 입력 데이터와 동일하게 복원될 수 있음을 보여 주었다.

직접 접근 방법을 통해 만들어진 이진 데이터에 메모리 환경을 고려하여 코딩을 적용하는 과정은 그림 6과 같다. 먼저 다중화를 통해 한 page당 총저장 용량( $d_{total}$ )을 결정하고 오류정정 능력을 고려하여 어떤 코딩을 쓸 것인가를 결정한다. ( $n, k$ )블록 코딩을 사용하면 코딩길이는  $n$ , 데이터 길이는  $k$ 가 되고,  $n - k$ 는 에러 정정을 위해 첨가되는 검사 비트가 된다. 그런 다음 한 페이지에 검사 비트를 제외한 순수한 데이터 저장 용량( $d_{page}$ )을 계산하기 위해  $d_{total}$ 를  $n$ 으로 나누어 코딩 횟수( $m$ )를 결정하고 그 횟수만큼  $k$ 를 곱하면  $d_{page} = d_{total} - (m \times k)$ 가 된다. 용량이  $L$ 인 영상 파일이 있다면 프로그램을 통해 데이터를 읽어 들여  $d_{page}$ 만큼씩 자르게 되면 이 잘라진 페이지 수가 메모리에 기록될 디지털 홀로그램 개수가 된다.

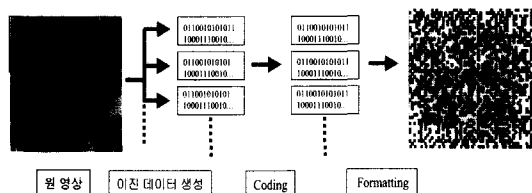
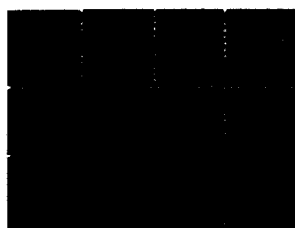


그림 6. 입력 데이터 처리 과정  
Fig. 6. Input data processing.

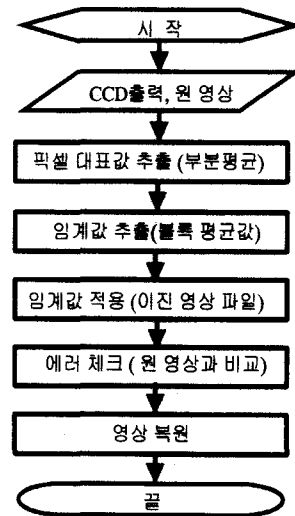
2. 임계치리를 이용한 출력 처리

재생된 디지털 홀로그램의 특성을 분석함으로써 이진 영상처리를 적용하였다. 디지털 광메모리 시스템에서 1차적인 에러는 출력 영상으로부터 이진 데이터를 추출할 때 발생하기 때문에 재생된 홀로그램을 분석하는 것은 매우 중요하다. 홀로그램 영상은 몇 가지 특징을 가지고 있다. 첫째, 기록 매질과 광학소자에 의해 재

생된 영상은 입력과는 다르게 0~255의 그레이 값을 가지게 된다. 즉, 이진 영상처리를 해야 되는 주원인이 된다. 하지만 재생된 영상의 경계가 뚜렷하다면 이러한 SLM의 특징을 이용하여 다단계 입력이 가능하다. 둘째, 광학소자의 배열과 렌즈의 배율에 의한 확대·축소시 영상의 회전이나 왜곡등과 같은 기하학적인 외형의 변화를 가질 수 있다. 세번째, 신호빔과 기준빔의 가우시안 분포로 인해 영상이 불균일한 밝기로 재생될 수 있으며 입력과 출력이 정확히 픽셀 매칭이 이루어지기 어렵다. 이러한 재생영상의 특징을 바탕으로 다음과 같은 영상처리를 수행하였다.



(a)



(b)

그림 7. 출력 영상 처리

- (a) 블록 평균 적용
- (b) 이진 영상처리

Fig. 7. Output image processing.

- (a) application of block mean.
- (b) binary image processing.

재생된 영상은 다양한 그레이 값을 가지기 때문에 임계값(threshold)과 픽셀의 대표값을 비교함으로써 이

진 데이터를 추출하는 임계처리 방법을 사용하였다. 먼저 출력단 영상의 불균일함으로 인해 생기는 에러를 줄이기 위해 X와 Y 방향의 사각형 블록을 나누어 각각의 블록에 대한 평균값을 취함으로써 임계값을 얻었다. 또한 입력단의 한 픽셀이 출력단에서는 여러 개의 픽셀이 모여 표시되기 때문에 입력의 한 픽셀을 나타내는 대표값이 필요하게 된다. 대표값을 얻기 위한 방법으로 픽셀의 중앙값을 추출하는 방법과 전체 픽셀의 평균값을 구하는 방법 등이 있지만 전자의 경우 중앙값에 에러가 생기면 전체가 픽셀의 에러가 발생할 수 있으며, 반면에 후자와 같이 전체 평균을 구하게 되면 계산 시간과 인접한 사각형 블록과 겹침으로서 에러가 발생하게 된다. 따라서 두 방법을 혼용한 여러 픽셀 중에서 중심값으로부터 일정한 블록 안에 위치한 상하, 좌우의 값들을 추출하여 평균값을 구했다. SLM의 영상과 CCD출력 영상의 픽셀 매칭에 대한 문제점은 남은 픽셀의 값을 계산하여 중간에 1픽셀을 더하거나 빼므로서 보상을 하였다. 그림 7에는 블록 평균 방법과 디지털 홀로그램으로부터 이진 데이터를 추출하는 과정을 나타내었다.

#### IV. 실험 및 분석

본 논문에서는 디지털 홀로그램을 저장하고 복원할 수 있는 광 메모리 시스템을 설계하였고, 하드 디스크에 압축된 영상 데이터를 이용하여 시스템을 분석하였다. 그림 8는 각도 다중화를 이용하여 디지털 홀로그램을 중첩시키기 위한 실험 구성도이다. 기록매질로는 Deltronic사의 LiNbO<sub>3</sub> 결정을, 광원으로는 중심파장이 514.5nm인 Ar 레이저(Lexel 사)를 사용하였다. 빔 분리기기에 의해 나누어진 신호빔과 간섭빔을 결정면에서 대하여  $\theta = 90^\circ$ 로 결합시켰다. 신호의 인가 없이 SLM을 통과한 신호빔과 기준빔의 세기비는 가장 높은 회절 효율을 갖는 1 : 5로 하였다. 총 입사빔의 세기는  $55[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 이었고, 기준빔과 신호빔의 세기는 각각  $20.03[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 와  $4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 로 조정하였다. 표 1은 실험에 사용한 조건을 나타내었다.

기준빔은 확대하여 크기가 8mm×8mm인 사각형 개구를 통과시키고 스텝모터에 설치된 미러에 의해 3스텝(0.0084°)씩 정밀하게 각도를 제어하였다. 회전 오차는 모터에 설치된 미러에서 발생하므로 미러를 회전축의 중심에 위치시킴으로써 각도 어긋남에 따른 회전

오차를 보정하였고 회전속도와 각도는 프로그램에 따라 PC의 병렬포트를 통해 제어하였다. 또한 회전 방향의 변경에 따른 backlash를 방지하기 위해 각도 다중화는 반시계 방향으로만 회전시켰다.

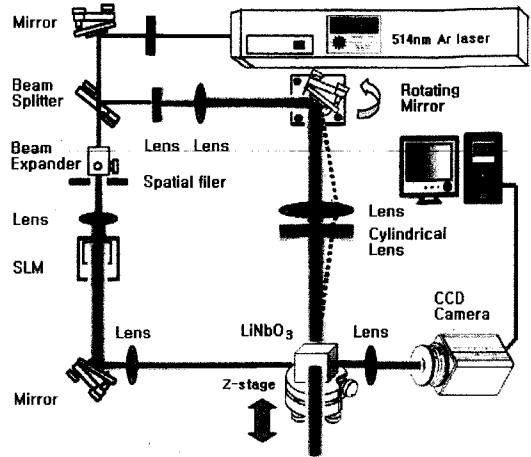


그림 8. 다중홀로그램을 기록하기 위한 실험도

Fig. 8. Experimental setup for recording multiple hologram.

표 1. 실험 조건

Table 1. Experimental condition.

광 원	Ar 레이저(Lexel)
기록매질	LiNbO <sub>3</sub> (Deltronics:1cm×1cm×1cm,0.015wt %:Fe ion )
SLM	Epson TFT LCD:800×600
CCD	Panasonic:768×494
영상보드	Kasan:Win X perfect IV
스텝모터	Oriental:CFK 569K(No reduction gear)

신호빔은 빔 확장기와 필터를 통해 균일한 평행광으로 만들어 SLM에 입력된 신호에 따라 페이지 단위로 변조시켰다. 이렇게 변조된 각각의 페이지는 주소지정을 위해 각도 다중화되는 간섭빔과 결정내에서 결합된다. 기준빔의 넓이는 8mm×2.5mm로 하여 두빔의 결합 면적을 높임으로서 홀로그램이 강하게 기록되도록 하였으며, 정착(fixing)은 수행하지 않았다.

본 논문에서는 페이지당 저장 용량을 65×54(3510bits)인 디지털 홀로그램을 제작하였으며, 출력 영상에서 발생할 수 있는 단일 및 연접 오류를 검출하고 정정하기 위해 GF(2<sup>8</sup>)상의 (15, 11) RS부호를 사용하였다. RS부

호는 순회부호(cyclic code)의 일종이며 비2원 BCH부호의 한 부류로서, 유한체(finite field)  $GF(2^m)$ 상의  $2^m$ 개의 심볼로 이루어지는 블록부호(block code)이다. 각 심볼은  $m$ 개의 비트로 구성되어 있으며, 부호장(code word)을  $n$ , 정보장(information length)을  $k$ 라고 할 때,  $t$ 개 이하의 오류를 정정할 수 있는  $(n, k)$ RS부호에 대한 매개변수는 다음과 같이 나타낸다.<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} \text{부호장} : n &= 2^m - 1 [\text{symbols}] \\ &= m(2^m - 1) [\text{bits}] \\ \text{정보장} : k &= n - 2t [\text{symbols}] \\ &= m(n - 2t) [\text{bits}] \\ \text{검사장} : n - k &= 2t [\text{symbols}] \\ &= m(2t) [\text{bits}] \\ \text{최소거리} : d_{\min} &= 2t + 1 [\text{symbols}] \end{aligned}$$

위의 조건에 따라 (15, 11) RS부호에서 오류 정정을 위해 추가되는 검사 비트는 4심볼 ( $n - k$ )이며,  $m = 4$ 이므로 한 심볼은 4비트로 구성된다. RS부호의 오류 정정 능력은  $(n - k)$  심볼/2로 주어지므로  $60(15 \times 4)$ 비트 중에서 최대  $8(2 \times 4)$ 비트의 오류를 정정할 수 있으며 정보율은 0.73이다. 디지털 홀로그램의 페이지 당 정보 저장 용량은 3510비트이므로 한 페이지를 코딩할 경우 58번(3480비트)의 코딩이 수행되고 30비트는 남게 된다. 남은 30비트는 정보 비트에 포함시키지 않았다.

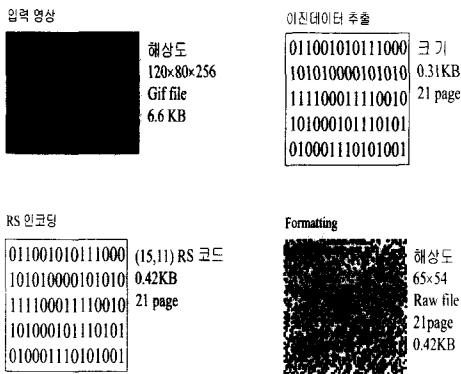


그림 9. 입력 디지털 데이터  
Fig. 9. Input digital data.

그림 9는 입력 영상이 SLM을 통해 광신호로 변조될 디지털 홀로그램으로 제작되는 과정을 보여주고 있다. 입력 데이터로는  $128 \times 80 \times 256(6.6KB)$  해상도를 갖는

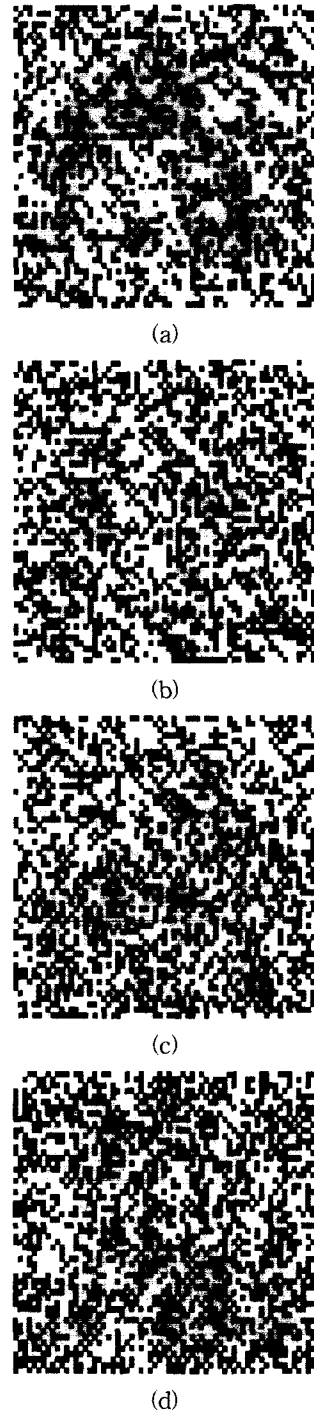
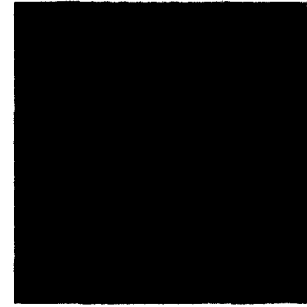


그림 10. 코딩된 디지털 홀로그램 데이터  
(a) 18번째 홀로그램 (b) 19번째 홀로그램  
(c) 20번째 홀로그램 (d) 21번째 홀로그램  
Fig. 10. The coded digital hologram data.  
(a) the 18th hologram. (b) the 19th hologram.  
(c) the 20th hologram. (d) the 21th hologram.

컬러 영상을 사용하였다. 검사 비트를 제외한 순수한 dpage는 2552 비트이며 총 22장의 입력 데이터를 만들었다. 22번째 page는 여분데이터로 코딩을 수행하지 않았으며 21장의 이진 데이터를 인코딩하여 한 장에 저장되는 정보를 3510비트가 되도록 하였다. 이 정보량은 정보를 가지고 있지 않는 여분의 30비트가 포함된 것이다. 마지막으로 21페이지의 이진 데이터들은 포매팅(formatting) 과정을 거쳐 디지털 홀로그램으로 변환하였으며, 400%확대되어 SLM에 입력하였다. 그림 10에는 영상 정보로 인코딩된 몇 개의 디지털 홀로그램을 보여주고 있으며 이러한 각 페이지들은 균일한 회절 효율을 얻기 위해 노출 시간계획에 따라 저장시켰다.

기록된 영상을 재생하기 위해, 기준빔은 스텝모터를 제어하여 각각의 신호가 갖는 브래그 각도로 입사시켰다. CCD에서 나오는 영상은 가산 영상보드로 화면 캡처를 통해 하드디스크에 저장하였다. CCD를 통해 캡처된 홀로그램 영상은 해상도가  $696 \times 475 \times 16M$ 이고, 약  $1^\circ$ 정도로 회전된 영상이었다. 그러나 전체적인 빔 분포가 비교적 균일한 밝기를 가지고 있으며 간섭에 의한 잡음은 나타나지 않았다. 캡처된 데이터로부터 이진영상 처리를 수행하기 위해, 영상을 수평으로 회전시킨 다음 데이터가 없는 부분과 컬러 값을 제거하여 그림 11과 같이  $509 \times 379 \times 256$ 해상도를 갖는 21페이지의 그레이 영상을 만들었다. '흑'과 '백'의 입력영상과는 달리 재생된 영상이 다양한 명암분포를 가지고 있지만, 비트 간의 정보는 확연히 구분되고 있다. 홀로그램에 희미한 간섭무늬가 나타나는 현상은 결정면의 반사에 의한 것으로 사료되며 반사방지용 코팅 처리가 된 결정이나 slight wedge을 사용함으로써 제거될 것으로 보인다.<sup>[3]</sup>

그림 12에서는 그레이 영상으로부터 이진 데이터가 추출되는 과정을 보여주고 있다. 픽셀대표값을 구하기 위해, 크기가  $509 \times 379$ 인 영상을  $65 \times 54$ 로 나누었다. 그 결과 CCD출력 데이터에서  $7.83 \times 7.01$ 개의 픽셀이 모여야 입력의 1bit를 표시하며 정확히 1:7이나 1:8로 픽셀매칭이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이와 같이 남는 픽셀 값은 프로그램을 통해 주기적으로 1bit를 추가하거나 제거함으로써 보상하였다. 그림 12(a)는 첫 번째 홀로그램으로 0과 1을 나타내는 빛의 세기분포가 매우 뚜렷함을 알 수 있으며 그림 12(b)에서는 명암의 차이를 수치상으로 보여주고 있다. 그림 12(b)에서 보여주듯이 픽셀 대표값은 중심으로부터 일정한 거리에 있는 값들의 평균을 취했다. 임계 처리를 위한 블록 평



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 11. 순수한 데이터 영상

- (a) 18번째 홀로그램 (b) 19번째 홀로그램  
(c) 20번째 홀로그램 (d) 21번째 홀로그램

Fig. 11. A pure data image.

- (a) the 18th hologram. (b) the 19th hologram.  
(c) the 20th hologram. (d) the 21th hologram.





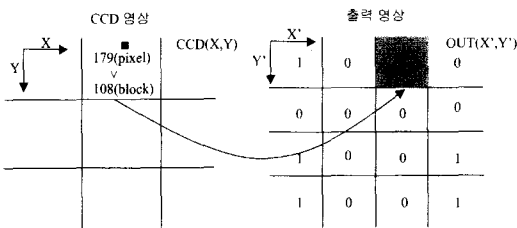
(a)

19	23	37	51	58	61	59	56	41	30	24
24	30	52	84	96	92	94	89	68	46	30
31	41	74	113	122	118	115	108	79	51	29
43	64	125	190	203	198	194	177	124	72	33
38	62	118	175				172	120	71	35
34	66	124	182				197	136	81	41
37	71	129	193				195	138	81	40
42	81	139	217	231	224	227	208	155	90	43
41	71	119	175	186	182	186	170	123	71	35
36	51	82	99	94	95	88	80	57	33	18
31	42	61	81	82	82	80	72	53	33	20

(b)

103	113	127	108	112
118	104	137	121	119
116	110	110	110	101
119	122	112	124	116

(c)



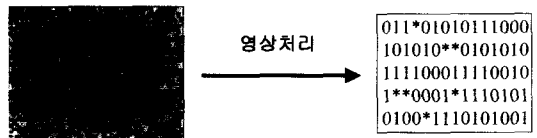
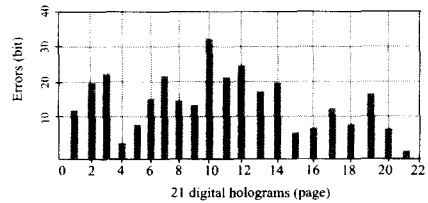
(d)

그림 12. 임계치리를 이용한 이진 데이터 추출  
 (a) 재생된 홀로그램 (b) 픽셀 대표값 추출  
 (c) 불균일한 블록 평균값 (d) 임계값 비교  
 Fig. 12. Extracting of binary data using threshold processing.

- (a) retrieved hologram.
- (b) extracting pixel represent value.
- (c) nonuniform block mean value.
- (d) comparison of threshold value.

균값은 그림 12(c)에 나타내었다. 빔 분포가 비교적 균일함에 불구하고 각 블록간에 평균값이 다를 수 있으며 최대 36정도의 차이를 보여주고 있다. 마지막으로, 그림 12(d)와 같이 픽셀 대표값과 블록 평균값을 임계치리과정을 통해 이진 데이터를 추출하였다.

21 페이지의 홀로그램에 대해 영상처리를 수행한 결과는 그림 13에 나타내었다. 에러 분포가 산발 및 연접 형태를 띠고 있으며, 비교적 불균일한 분포를 가지고 있다. 이러한 원인은 출력 영상들간의 차이정보보다는 프로그램 상에서 데이터가 없는 부분을 제거할 때, 정확히 정보가 있는 곳과 없는 곳을 찾는 경계점 추출로부터 발생하는 것으로 여겨지며, 비트를 균일하게 분포시켜주는 변조 코드(modulation code)를 수행한다면 페이지당 에러 빈도수를 더욱더 줄일 수 있을 것이다.



509\*379

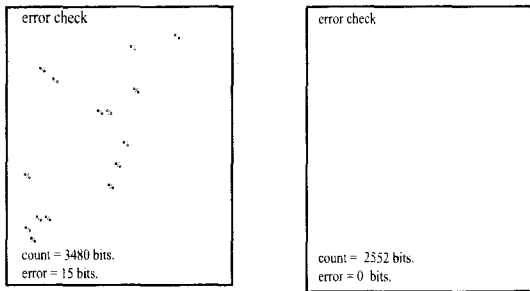
3510bits(21pages)

그림 13. 이진 영상처리를 통한 에러 분포  
 Fig. 13. Error distribution by binary image processing.

영상 복원에 앞서, 영상처리에서 발생한 단일 및 연접 오류는 RS디코딩 과정을 통해서 모두 정정되었다. 그림 14(a)에서는 15번째 홀로그램이 에러가 정정되는 것을 보여주고 있으며, 그림 14(b)에는 21페이지에 대한 이진 영상처리결과와 디코딩 결과를 정리하였다. 이진 영상처리의 성능 향상과 코딩에 따른 검사 비트를 줄이고, 광학 시스템에서 페이지당 저장 용량을 늘린다면, 광메모리 저장 용량이 더욱 더 늘어날 것으로 사료된다.

복원 영상에 에러 개수가 미치는 영향을 알아보기 위해, 그림 15(a)와 같이 디코딩을 거치지 않는 14번째 페이지를 추가하여 영상을 합성해 보았다. 14번째 페이지의 에러 개수와 실제 영상에서 나타나는 에러의 개

수가 동일하지 않음을 알 수 있다. 이것은 시스템 입력 부에서 영상을 raw 파일 형태로 처리하지 않고 하드 디스크상에 압축되어 있는 gif 파일을 이진데이터로 직접 인코딩 하였기 때문이다. 반면에, 그림 15(b)에서 처럼 에러가 모두 정정된 데이터를 이용할 경우 입력데이터와 정확히 일치하는 영상을 얻었다.



(a)

번호	1	2	3	4	5	6	7
에러 개수	12	20	23	4	8	16	22
에러율 (error/page × 10 <sup>-4</sup> )	3.4	5.7	6.6	1.1	2.2	4.5	6.3
디코딩 후	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
번호	8	9	10	11	12	13	14
에러 개수	15	14	33	21	25	18	20
에러율 (error/page × 10 <sup>-4</sup> )	4.3	4.0	9.4	6.0	7.1	5.1	5.0
디코딩 후	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
번호	15	16	17	18	19	20	21
에러 개수	6	7	13	9	17	7	3
에러율 (error/page × 10 <sup>-4</sup> )	1.7	2.2	3.7	2.5	4.8	2.0	0.8
디코딩 후	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(b)

그림 14. (15, 11)리드-솔로몬 코드를 이용한 디코딩

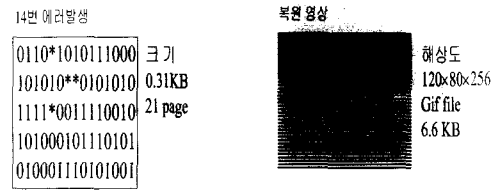
- (a) 15번째 홀로그램에 대한 디코딩 결과
- (b) 21장 홀로그램에 대한 디코딩 결과

Fig. 14. Decoding using (15, 11) Reed-Solomon code.

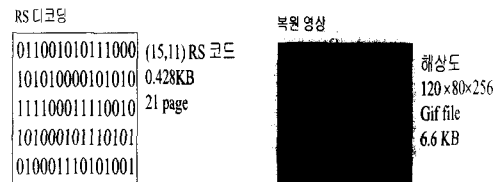
- (a) decoding result of the 15th hologram.
- (b) decoding result of 21 pates.

결국, 디지털 정보를 저장할 수 있는 시스템을 구성하여 압축된 데이터를 직접 접근함으로써 파일의 종류와 상관없이, 광메모리에 저장되는 페이지 수를 줄일 수 있었다. 또한 이진 영상처리과정을 통해 홀로그램 영상으로 부터 데이터를 추출할 수 있었고 에러 정정

을 위한 RS코딩을 적용함으로써 이진 영상처리에서 발생한 에러를 정정할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 15. 이진 데이터 처리에 따른 출력 영상 복원

- (a) 에러 정정을 수행하지 않은 14번째 영상을 이용한 영상복원
- (b) 에러 정정을 수행하지 않은 14번째 영상을 이용한 영상복원

Fig. 15. Output image reconstruction due to binary data processing.

- (a) image reconstruction using the 14th image which didn't carry out error correction.
- (b) image reconstruction using the 14th image which didn't carry out error correction.

## V. 결론

본 논문에서는 새롭게 제안된 직접 접근 방법을 이용한 이진 영상처리와 재생된 디지털 홀로그래프를 분석함으로써 컬러 영상을 저장하고 재생할 수 있는 디지털 홀로그래픽 정보 저장 시스템을 구현하였다. 이진 접근 방법을 통해 영상 처리를 수행한 결과, raw 파일을 이용하여 영상처리를 수행하는 것보다 광메모리에 저장되는 페이지수를 줄일 수 있었으며, 압축된 128×80×256(6.6KB)해상도의 컬러 영상을 재생할 수 있었다. 또한 문자 파일이나 동영상 파일등과 같이 파일의 종류에 관계없이 디지털 홀로그래프로 변환될 수 있음을 보여주었다. 블록 평균값과 픽셀 대표값의 임계 처리를 통해 발생한 33개 이하의 에러는 (15, 11) RS디코

당 과정을 거쳐 모두 정정할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Gunther, R. M. Macfarlane, and G.T. Sincerbox, "Pixel-matched holographic data storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, vol. 22 no. 19, pp. 1509-1511, 1997.

[2] E. C. Bjornson, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Digital quasi-phase-matched two-color nonvolatile holographic storage," *App. Opt.*, vol. 36, no. 14, pp. 3090-3106, 1997.

[3] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO3 crystal," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 605-607, 1991.

[4] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic memories," *Scientific American*, vol. 273, no. 5, pp. 70-76, 1995.

[5] J. Heanue, M. Bashaw, and L. Hesselink, "Volume holographic storage and retrieval of digital data," *Science* 265, pp. 749-752, 1994

[6] J. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory system: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.

[7] IBM Team, "Holographic storage promises high density," *Laser Focus World*, vol. 23, no. 11, pp. 81-93, 1996.

[8] 최안식, 정종래, 이재진, 최종호, 김민지, 백운식, 안준원, 김정희, 김 남, "각 다중화된 디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템," *Photonics Conference '97*, pp. 185-186, 1997

[9] 김정희, 김성구, 안준원, 김남, 이권연, 양영범, "동영상 및 디지털 데이터 처리를 위한 광메모리 시스템 구현," *Photonics Conference '98*, pp. 234-235, 1998

[10] 신동학, 장주석, "회전, 각, 그리고 공간다중화 방법을 결합 사용한 홀로그램 기록 시스템," *한국광학회지, 제9권 제3호*, pp. 199-204, 1998

[11] 강훈중, 이승현, 김은수, "체적 홀로그램을 이용한 동영상 비디오 시스템 구현," *제3회 광정보처리 학술발표회 및 3차원 영상 매체기술 국제 워크샵 논문집*, vol. 3, no. 1, pp. 106-107, 1998

[12] 최안식, 이재진, 백운식, 박주연, "Page-access 디지털 홀로그래픽 메모리 시스템," *Photonics Conference '98*, pp. 232-233, 1998

[13] H.-Y. S. Li, and J. Hong, "Nonuniformity in hologram diffraction efficiency from time constant error in the recording schedule," *J. Opt. Soc. Am.*, B 13, pp. 894-899, 1996.

[14] 이만영, "BCII 부호와 Reed-Solomon 부호," *민음사*, 1990

저 자 소 개



金正淮(正會員)  
1969년 4월 18일생. 1997월 2월 순천대학교 전자공학과(공학사). 1999년 2월 충북대 정보통신공학과(공학석사). 1999월 3월~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사과정. 주 관심 분야는 Optical Memory,

Optical Signal Processing, Optical Device, Holography

安俊遠(正會員) 第 36卷 D編 第 6號 參照

金 男(正會員) 第 36卷 D編 第 6號 參照

李權蓮(正會員) 第 36卷 D編 第 6號 參照