

논문 2004-41SD-2-3

# 디지털 홀로그래픽 정보 저장을 위한 새로운 데이터 매트릭스 구조 및 알고리즘 구현

## (New Data Matrix Structure and Algorithm Implementation for Digital Holographic Data Storage)

최재광\*, 김정회\*\*, 김남\*

(Jae-Kwang Choi, Jung-Hoi Kim, and Nam Kim)

### 요 약

디지털 홀로그래픽 정보 저장을 위한 새로운 데이터 매트릭스 구조와 이 구조를 통해 정보를 추출할 수 있는 알고리즘을 제안하고 구현하였다. 제안된 데이터 매트릭스 구조는 실제 사용자 정보와 기하학적 변형에 따른 raw BER을 줄이기 위한 참조 격자로 이루어져있고, 정보를 추출하는 알고리즘은 참조격자의 위치를 판별하고 이 정보로부터 실제 사용자 정보를 추출하는 구조로 되어 있다. 실험 결과 영상 이동, 회전, 배율변화에 대해 각각  $3.09 \times 10^{-18}$ ,  $6.14 \times 10^{-12}$ ,  $1.2 \times 10^{-7}$ 의 평균 raw BER을 얻음으로서, 기하학적 변형에 대한 우수한 검출특성을 갖고 있음이 증명되었다.

### Abstract

In this paper, new data matrix structure and respective processing algorithm for digital holographic storage are proposed. Data matrix consists of user data and reference grid which is used to compensate geometrical errors such as magnification, shift and rotation of stored information. Processing algorithm identifies the location of reference grid and extracts user data. As a result of experiment, raw BER in case of shift, rotation and magnification are  $3.09 \times 10^{-18}$ ,  $6.14 \times 10^{-12}$ ,  $1.2 \times 10^{-7}$ , respectively.

**Keywords** : Digital holographic storage, image detection, over-sampling

## I. 서 론

디지털 홀로그래픽 정보 저장(digital holographic data storage)기술은 빠른 병렬 접속성(fast parallel access)과 높은 정보 저장능력(high storage density)으로 인하여 최근까지도 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[1-3]</sup>. 이 기술은 감광성 매질(photosensitive material)의 동일한 영역에 신호빔과 기준빔의 간섭을 통해 다중 중첩된(superimposed) 디지털 페이지를 저장한

다. 부피형 홀로그램의 브라그 선택성(Bragg selectivity)은 저장된 데이터 페이지간의 독립적인 재생을 가능하게 한다. 1과 0으로 인코딩된 홀로그램은 밝고 어두운 픽셀로 이루어진 2차원 세기패턴으로 재생되고, CCD 카메라에 의해 병렬로 검출된 후 이진 데이터로 복원된다<sup>[4]</sup>. 2차원 검출기에서 추출되는 한 페이지의 정보량은 입력장치인 SLM(spatial light modulator)과 CCD(charge coupled device)의 해상도 및 픽셀매칭(pixel matching)에 의해 결정된다. 특히 1:1 픽셀 매칭의 경우 입출력 장치가 갖는 최대 해상도만큼 정보량을 늘릴 수 있는 반면, 매우 정밀한 광학 구성과 분해능이 높고 왜곡이 낮은 고성능의 렌즈 시스템이 요구된다<sup>[5]</sup>. 이로 인해 상대적으로 낮은 성능의 광

\* 정회원, \*\* 학생회원, 충북대학교 전기전자 컴퓨터 공학부  
(Chungbuk Nat'l University, School of Electrical & Computer Engineering, Division of information & Communication Engineering)

접수일자 : 2002년 10월 21일, 수정완료일 : 2004년 2월 9일

학계를 이용하여 용량은 적지만 재생 성능을 높인 오버-샘플링(over-sampling)방법이 많이 수행되고 있다.

실질적인 광학 시스템에서 재생된 홀로그램은 1차원 정보재생이 아닌 2차원 영상형태로 검출되기 때문에 여러 가지 외적인 요인에 의해 다양한 형태로 재생된다. 즉, 기록매질이나 CCD의 광축 방향에 대한 회전 및 기울기(tilt), 홀로그램 재생 렌즈의 위치이동, 외부 충격에 의한 광학계 변동 등으로 인하여 영상의 축방향 회전, 마름모꼴 등의 변형된 사각형, 배율 변화, 그리고 단순한 재생 위치 변동에 이르기까지 많은 기하학적인 왜곡이 발생하게 된다.

본 논문에서는 재생 홀로그램의 기하학적인 왜곡에 대응하기 위해 순수 사용자 데이터 외에 신호의 시작점 및 기하학적 변형을 검출하기 위한 참조격자가 추가된 새로운 2차원 데이터 매트릭스 구조 및 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 확인하였다.

## II. 새로운 데이터 매트릭스와 영상신호처리

### 1. 데이터 매트릭스의 형태와 처리순서

홀로그래픽 메모리 시스템에서 재생된 2차원 영상은 다양한 외적 요인에 의해 많은 기하학적 변형을 갖게 된다. 퓨리에 변환을 위한 렌즈가 갖는 수차와 렌즈계의 광축 정렬 오차를 들 수 있다. 본 논문에서는 렌즈계의 수차는 무시하고 CCD 카메라와 퓨리에 변환 렌즈의 광축 정렬 오차만을 고려한다. 광축 정렬 오차로 인한 광축 이탈, 광축에 대한 좌우 상하 경사각, 렌즈의 위치 이동 등은 구면 수차의 비대칭, 사다리꼴형 영상 재생 및 배율 변화를 발생시킨다. 기록매질의 회전 및 기울기에 의해 재생된 영상은 CCD 카메라에 입력되어 회전 및 이동, 사다리꼴 형태의 기하학적 변형을 갖는 2차원 영상으로 검출된다.

본 논문에서는 광학계에서 발생할 수 있는 여러 가지 기하학적 변형과 무관하게 고품질을 데이터를 획득하기 위한 새로운 2차원 데이터 매트릭스 구조를 제안하고 실험을 통해 검증하였다. 그림 1처럼, 제안된 데이터 구조는 순수 사용자 데이터와 이 데이터를 둘러싸고 있는 참조격자로 구성되어 있으며, 외부 참조 격자는 실제 데이터와 두 격자간의 간섭을 최소화하기 위해 한 픽셀씩 분리되어 있다.

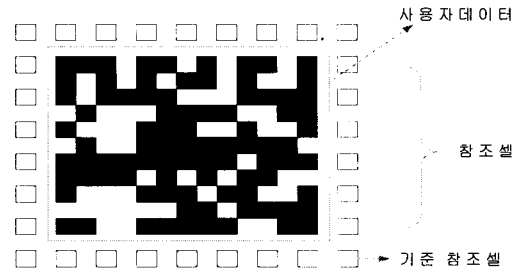
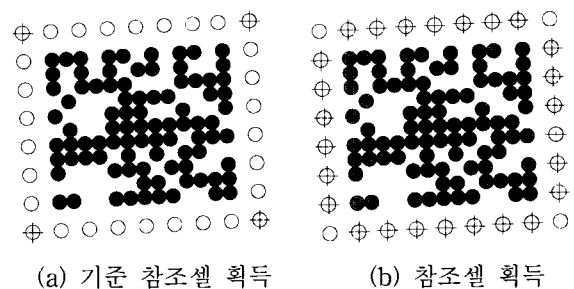


그림 1. 제안된 2차원 데이터 매트릭스 구조  
Fig. 1. Proposed data matrix structure.

참조격자는 주기적으로 반복되는 밝은 샘플링 픽셀들로 이루어져 있으며, 이 샘플링 픽셀들을 참조셀이라고 정의한다. 특히 참조 격자의 네 꼭지점에 위치한 셀을 기준 참조셀이라고 하며 상관을 통한 데이터 영역 추출에서 기준점 역할을 한다.

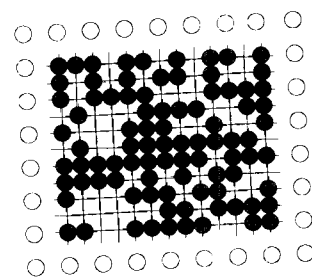
제안된 데이터 매트릭스를 이용한 신호 처리과정을 그림 2에 나타내었으며, 다음과 같은 과정을 통해 데이터 획득이 이루어진다.

- ① 영상 상관을 이용하여 기준 참조셀의 외각 픽셀을 검출하고 다시 이 셀의 중심을 찾는다. 이 중심점을 시작점이라고 정의했다. (그림 2(a))
- ② 검출된 네 개의 시작점으로부터 나머지 참조셀들의 중심점을 찾는다. (그림 2(b))
- ③ 서로 마주보는 4개의 참조셀의 중심점을 연결하여 교차점의 픽셀 값을 획득한다. (그림 2 (c))



(a) 기준 참조셀 획득

(b) 참조셀 획득



(c) 데이터 획득

그림 2. 데이터 매트릭스의 처리 과정  
Fig. 2. Processing procedure of data matrix.

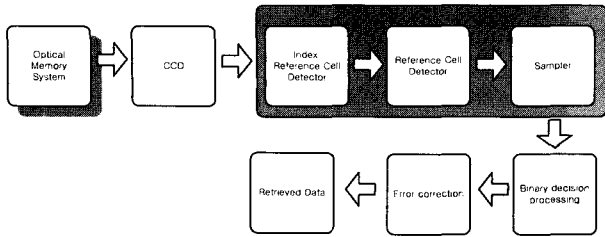


그림 3. 데이터 복원 신호처리 블록도  
Fig. 3. Block diagram of data reconstruction.

위와 같은 알고리즘을 통해 이진 데이터를 획득할 경우, 영상의 회전, 이동, 배율 변화 등의 기하학적 변형에 관계없이 이진 영상을 복원할 수 있다. 그림 3은 기존의 신호처리과정에 제안된 데이터 매트릭스의 처리를 위해 꼭지점 검출, 참조 격자 검출, 샘플러 기능이 추가된 새로운 형태의 데이터 복원 신호처리 블록도를 나타낸 것이다.

2. 기준 참조셀 검출

제안된 데이터 매트릭스를 처리하기 위한 알고리즘의 첫 번째 단계인 외부 참조 격자의 기준 참조셀 추출은 대각선 상관 탐색(diagonal correlation search)과 기준 참조셀들의 중심점 추출을 통한 2단계 신호처리로 수행된다.

첫 번째 단계는 4개의 기준 참조셀들의 근사적인 위치를 찾는 과정으로, 그림 4와 같이 대각선 방향으로 상관을 취한다. 이 방법은 데이터 매트릭스의 기하학적 구조에 바탕을 둔 것으로 기존의 이진 디지털 영상처리(binary digital image processing)기법을 참조하였다<sup>[6]</sup>. 기준 참조셀의 시작점을 추출할 때, 단일 픽셀 값을 고려하면 주위의 잡음으로 인해 오인식을 일으킬 수 있다. 따라서 픽셀 주변의 값까지 함께 고려하기 위해 1차원 필터와 정보와의 상관을 통해 시작점의 위치를 획득하였다.

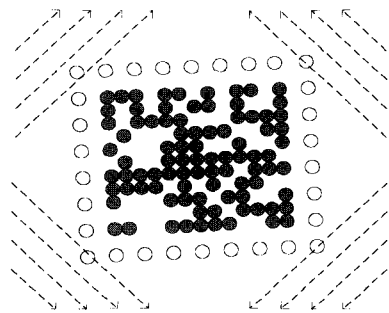


그림 4. 대각선 상관 검출  
Fig. 4. Diagonal correlation detection.

1차원 필터는 광학계를 통과한 점이 홀로그래픽 저장시스템의 PSF(point spread function)에 의해서 영상면에서 sync형태를 이루게 되는 점을 고려하여 제작되었다. 사용된 필터의 계수는  $r = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 2, 1, 0, -1, -2\}$ 이다.

대각선 상관 검출기는 영상의 외각으로부터 사선방향으로 추적을 수행하고 진행하는 때 위치에서 상관값을 계산한다. 이 상관값이 미리정해진 임계값보다 크면, 대각선 상관 검출기는 더 이상의 진행을 정지하고 현재 위치가 기준 참조셀의 영역내에 있다고 판단한다.

영상에서 특정위치  $x_{Curr}, y_{Curr}$ 에서의 상관값은

$$Corr = \sum_{m=0}^{M-1} s[m]r[m] \tag{1}$$

과 같이 표현된다<sup>[7]</sup>. 여기서, M은 필터의 크기이고,  $s[m]$ 은  $x_{Curr}, y_{Curr}$  위치에서의 상관값을 구하기 위해 입력되는  $x_{Curr}, y_{Curr}$ 을 중심으로 한 사선위치의 픽셀들이고,  $s[m]$ 은

$$s[m] = f[x_{Curr} - m - \frac{M}{2}, y_{Curr} + m + \frac{M}{2}] \tag{2}$$

이다.  $x_c, y_c$ 는 사선방향의 추적을 위해  $x_{Curr} + y_{Curr} = n$ 을 만족시키면서 진행하며 n은 n번째 사선을 의미한다.

두 번째 단계는 기준 참조셀의 중심을 찾는 과정이다. 대각선 상관 탐색에서 얻어지는 위치 정보는 1차원 상의 정보이다. 이 정보는 획득된 데이터 페이지의 밝기에 따라 변할 수 있는 값이다. 따라서, 정확한 위치 정보를 획득하기 위해서는 앞의 과정에서 얻어진 좌표 주위의 일정영역을 2차원적으로 검색하여 기준 참조셀의 중심점을 찾아야 한다. 픽셀의 중심을 찾는 방법으로 모멘트(moment)가 사용되었다.

모멘트는 2차원 영상에서 물체의 중심과 퍼짐 정도, 그리고 비틀림 등을 나타낸다. 영상의 세기 함수  $f(x, y)$ 에 대해  $p+q$  차원의 모멘트  $m_{pq}$ 는 다음과 같은 수식으로 정의된다<sup>[8]</sup>.

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \tag{3}$$

여기서, 0차 모멘트  $m_{00}$ 는  $f(x, y)$ 의 전체 합이 되므로 면적과 동일하며, 1차 모멘트  $m_{01}, m_{10}$ 을  $m_{00}$ 로 정규화하면 무게중심 좌표를 얻을 수 있다. 즉 검색 영역의 무게 중심 좌표( $x_c, y_c$ )는 다음과 같다.

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (4)$$

3. 참조셀 검출

기준 참조셀의 중심점을 얻은 후, 나머지 참조셀들의 위치를 찾는다. 참조셀들의 위치는 두 기준 참조셀의 위치 정보를 n등분하여 얻어진 근사위치에서 다시 모멘트를 구해 획득한다. 여기서 n은 미리알고있는 정보의 x, y 크기이다.

참조셀은 정확한 획득을 위해서 한 칸씩 띄워져 있지만 정보검출에서는 참조셀과 참조셀 사이의 어두운 영역에서의 위치정보도 필요하다. 따라서 어두운 영역에 대한 위치 값은 인접 참조셀간의 중심점으로 하였다. 이렇게 획득된 참조셀의 위치정보와 어두운 영역의 위치정보는 정보의 획득과정에 사용하기 위해 테이블에 저장된다.

4. 정보검출

참조셀들을 이용하여 실제 정보를 추출해내는 과정으로 정보의 한 픽셀은 상하, 좌우 4개의 참조셀이 교차하는 위치로부터 추출된다. 정보를 추출하는 과정은 아날로그 데이터로부터 샘플을 획득하는 과정과 유사하여 전체 과정을 샘플러(sampler)라고 정의하였다. 오버 샘플링된 시스템에서 디지털 정보 1 비트는 n×n의 정수 또는 실수 블록으로 표현되며, n은 오버 샘플링율이다. 본 논문에서는 1:6 오버샘플된 시스템을 가정하고 4개의 참조셀이 만나는 교차점을 중심으로 3×3의 픽셀 값들을 평균하여 대표 값으로 선택하였다. 중심 픽셀만을 선택할 경우 발생할 수 있는 에러와 전체 영역을 사용함으로 발생하는 인접 픽셀간의 간섭을 줄이기 위함이며, 이때 4개의 참조셀의 교차점의 위치는 직선의 방정식을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 네 개의 참조셀의 중심점을 각각 (x1, y1), (x2, y2), (x3, y3), (x4, y4) 라고 하고, 선택될 위치를 p, q 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{\frac{y_1 \times x_2 - y_2 \times x_1}{x_2 - x_1} - \frac{y_3 \times x_4 - y_4 \times x_3}{x_4 - x_3}}{\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}}, \quad q = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \times p + \frac{y_1 \times x_2 - y_2 \times x_1}{x_2 - x_1} \quad (6)$$

III. 실험 및 결과분석

새로운 데이터 매트릭스와 알고리즘을 검증하기 위해 그림 5와 같이 공간 다중화가 가능한 디지털 홀로그래픽 메모리 시스템을 구성하였다. 광원은 Coherent사의 532nm의 Nd:YAG레이저이며, 기록매질로는 Dupont사의 HRF150-38 포토 폴리머를 사용하였다. 입력 데이터는 이진화 과정과 RS 채널 코딩을 통해 EPSON사의 640×480의 TFT LCD에 디스플레이된 후 공간 필터링된 평행광에 의해 광신호로 변조되었다. 첫 번째 푸리에 렌즈에 의해 푸리에 변환된 신호는 4f 시스템을 통과한 기준빔과 결합되며, 결합된 빔 크기는 2mm×2mm이다. 영상 검출단은 9μm 픽셀의 SVGA급 웹카메라가 사용되었고, 입력단의 LCD와 1:6 오버 샘플링되었다. 공간 다중화는 1.5μm의 분해능을 갖는 선형 스테이지에 의해 2mm 간격으로 수행되었으며, 입력 프로그램과 하드웨어 컨트롤러를 통해 전자 셔터 및 모터 제어 등의 모든 동작을 완전 자동화시켰다.

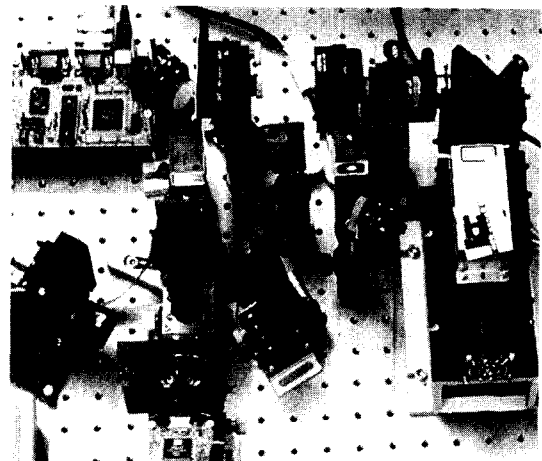
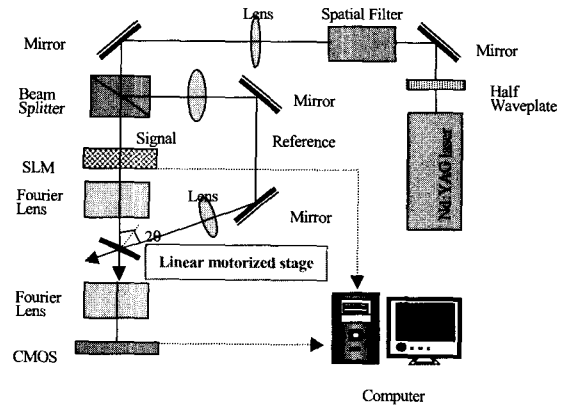
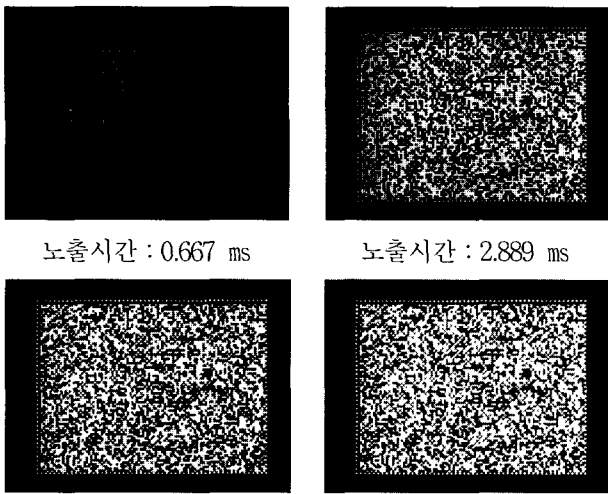
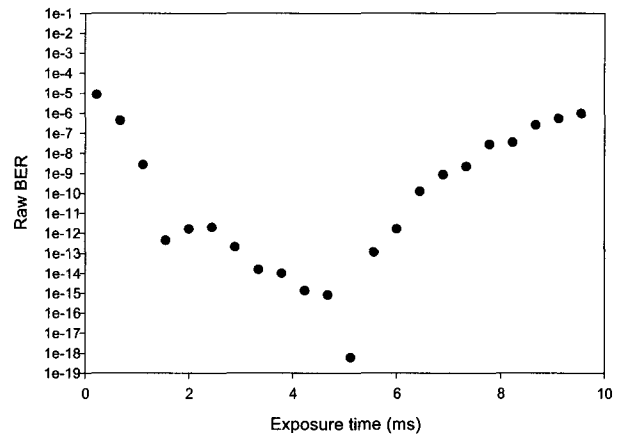


그림 5. 홀로그램 기록 시스템  
Fig. 5. Hologram recording system.

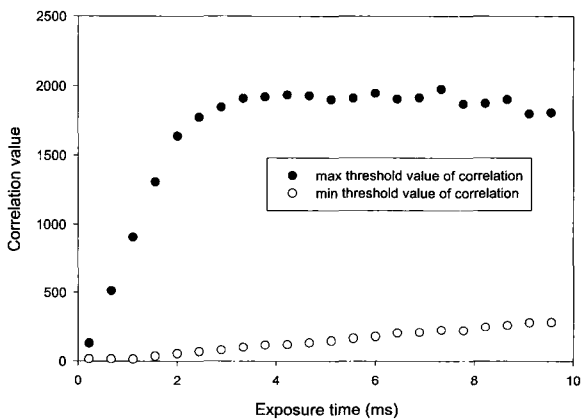


노출시간 : 0.667 ms      노출시간 : 2.889 ms  
 노출시간 : 4.667 ms      노출시간 : 8.667 ms  
 (a) 카메라 전자셔터의 노출 시간 변화에 따라 획득된 홀로그래프

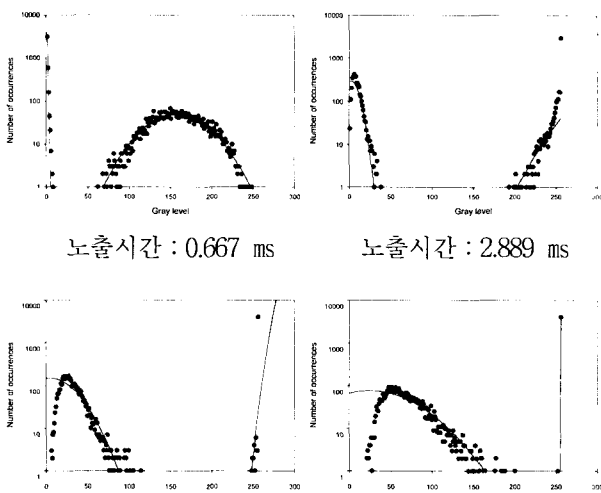


(d) 노출시간에 따른 raw BER

그림 6. 노출시간에 따른 raw BER 성능  
 Fig. 6. Raw BER versus exposure time.



(b) 기준 참조셀을 획득할수 있는 상관 임계값의 범위



노출시간 : 0.667 ms      노출시간 : 2.889 ms  
 노출시간 : 4.667 ms      노출시간 : 8.667 ms  
 (c) 획득된 홀로그래프의 히스토그램 분포 및 가우시안 피팅 곡선

본 논문에서는 먼저 노출에너지와 주위잡음을 증가시키면서 기준 참조셀을 정확히 획득할 수 있는 임계값(threshold)의 범위를 측정하고 이 값을 기준으로 디지털 홀로그래프 재생 성능을 살펴보았다. 또한, 영상의 이동 및 회전, 배율 변화에 따른 raw BER을 측정함으로써 제안된 알고리즘의 성능을 보였다. Raw BER은 영상처리 알고리즘의 마지막 단계인 샘플러를 통과한 정보에서 히스토그램을 구한 다음 가우시안 피팅(gaussian fitting)을 통해 통계적으로 계산하였다<sup>[9-11]</sup>.

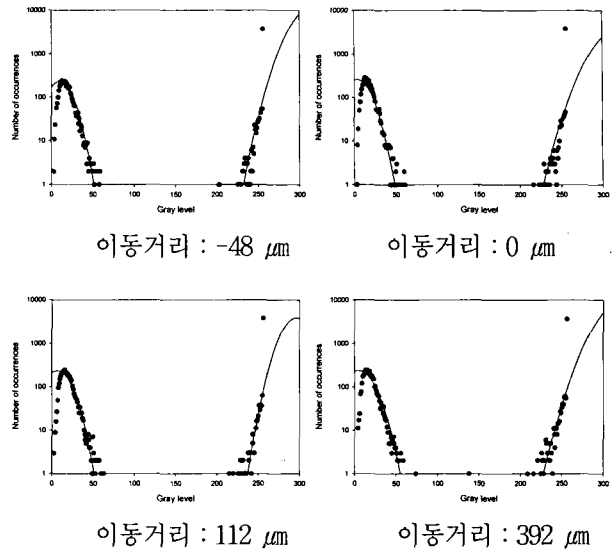
### 1. 노출시간 변화에 따른 데이터 추출

재생된 홀로그래프는 사용된 광원의 세기 변화, 기록시 홀로그래프의 회절 효율, 저장된 페이지간의 회절 효율, 기타 외부 환경 등에 의해 동일한 밝기로 복원되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 카메라 전자셔터의 노출시간을 변화시키면서 기준 참조셀을 획득할 수 있는 임계값의 범위와 raw BER을 측정하였다. 그림 6(a)은 카메라 전자셔터의 노출시간을 0.223ms에서 0.44ms씩 증가시키면서 재생된 홀로그래프이다. 낮은 에너지에서는 “0” 픽셀에 비해 상대적으로 “1” 픽셀이 차지하는 영역이 좁기 때문에 인접하는 “1” 픽셀간에도 빈 공간이 존재하지만, 에너지가 과포화될 때는 오히려 “1” 픽셀이 “0” 픽셀의 영역을 침범하고 있다. 그림 6(b)는 기준 참조셀을 정확히 획득할 수 있는 상관 임계값의 범위이다. 최고 임계값의 경우 4.223ms까지 노출 시간에 비례하여 급격히 증가하다가 이후 거의 포화되는 곡선 형태를 띄며, 최소 임계값의 증가율은 낮지만 최대 임계

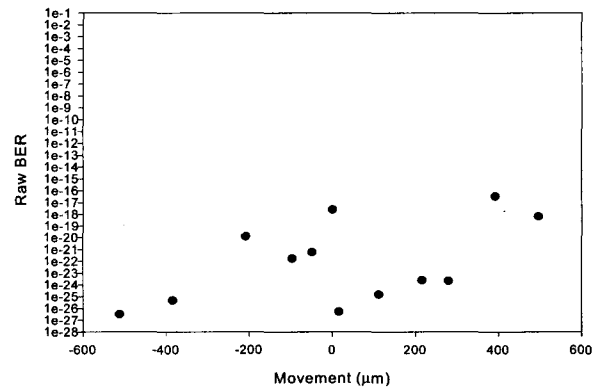
값의 증가율은 매우 높음을 알 수 있다. 그림 6(c)의 히스토그램은 기준 참조셀을 획득할 수 있는 임계범위내에서 알고리즘을 수행하여 획득된 정보의 히스토그램이다. 낮은 에너지에선 분산이 큰 "1" 픽셀의 머리부분이 잡음의 원인이 되고있으며, 에너지가 과포화되면 반대로 "0" 픽셀의 꼬리부분이 잡음 요인으로 작용한다. Raw BER도 역시 그림 6(d)와 같이 인접 픽셀간의 잡음이 최소값에 대해 비선형적으로 감소하다 다시 증가하는 V형태의 분포를 나타냄을 알 수 있다. 2.889ms 에서 6.889ms의 노출 시간 영역에서  $2.0 \times 10^{-12}$  이하의 raw BER을 얻었다.

2. 영상의 이동 및 회전에 따른 성능 분석

푸리에 변환 홀로그램에서 기록매질의 위치변화는 카메라의 영상 면에서도 동일하게 나타남으로 기록매질을 고정시키고 카메라를 회전 및 이동시키면서 샘플 영상을 획득하였다. 이때 카메라의 노출 시간은 그림 6의 결과로부터 2.8ms로 고정하였다. 그림 7(a)은 카메라를 영상평면의 중심부에서 좌우로 움직이면서 재생한 홀로그램이다. 그림 7(b)의 히스토그램과 같이 이동 거리에 따라 "1"과 "0" 분포의 전체적인 모양은 비슷하지만 꼬리부분이 약간씩 변함을 알 수 있다. 이러한 변화는 그림 7(c)에서 보듯이  $3.09 \times 10^{-18}$ 의 매우 낮은 raw BER 값을 중심으로 큰 변화 폭을 주고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 이동 거리에 따라 랜덤한 분포를 보여줌으로서 이동거리의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 변화 폭이 큰 이유는 카메라를 고정하지 않고 이동할 때마다 영상 평면에서 카메라를 재조정했기 때문으로 사료된다.

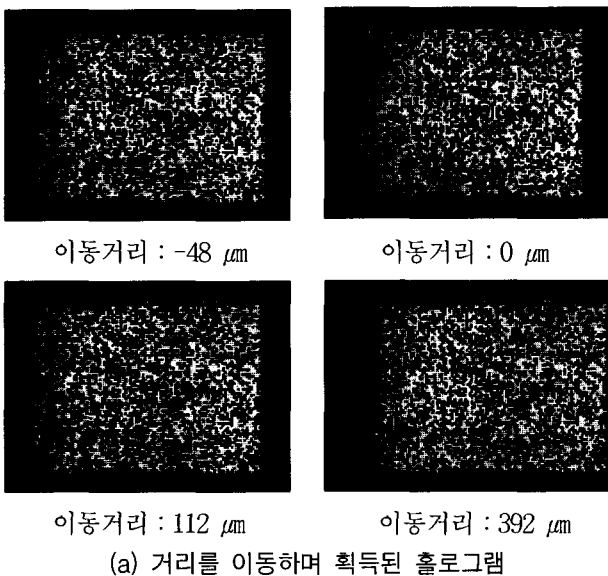


(b) 히스토그램 분포 및 가우시안 피팅곡선

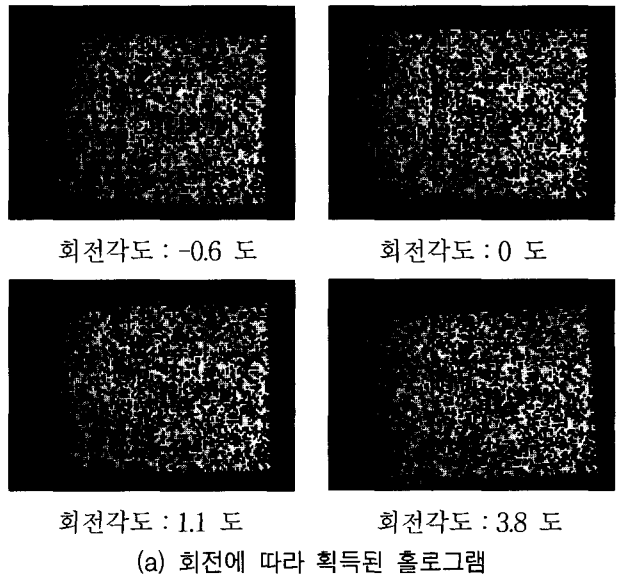


(c) 이동 거리에 따른 raw BER

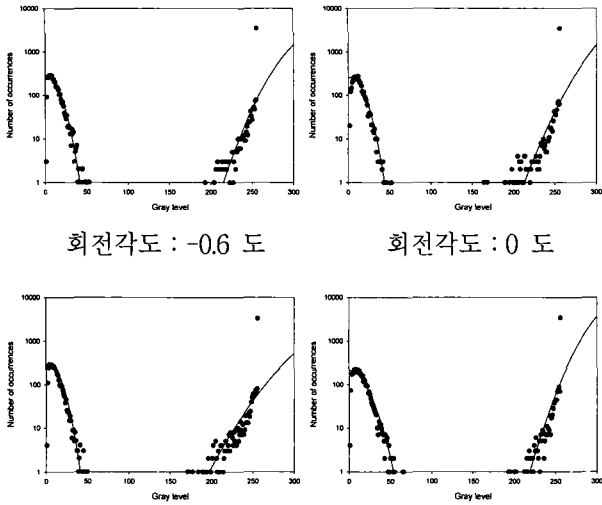
그림 7. 이동 거리에 따른 raw BER 성능  
Fig. 7. Raw BER versus movements.



(a) 거리를 이동하며 획득된 홀로그램



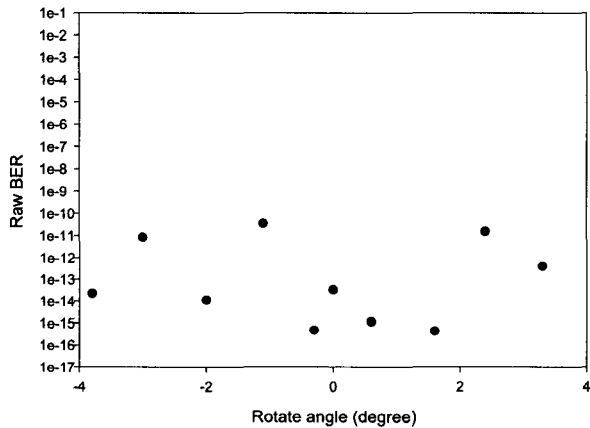
(a) 회전에 따라 획득된 홀로그램



회전각도 : -0.6 도      회전각도 : 0 도

회전각도 : 1.1 도      회전각도 : 3.8 도

(b) 히스토그램 및 가우시안 피팅곡선



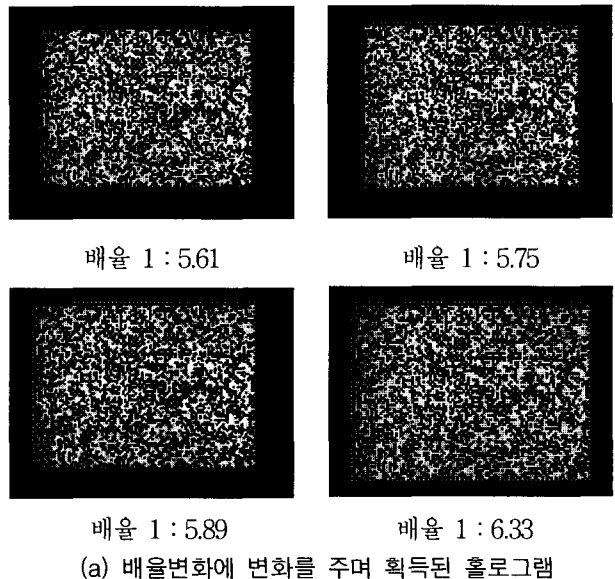
(c) 회전 각도에 따른 raw BER

그림 8. 회전 각도에 따른 raw BER 성능  
Fig. 8. Raw BER versus rotation.

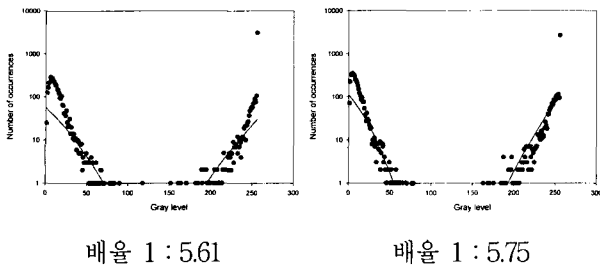
그림 8(a)는 goniometer를 이용하여 영상평면에 대해 시계방향과 반시계방향으로 회전된 샘플 영상이다. 최대 회전 각도는 시계방향으로 3.3도, 반시계방향으로 3.8도였다. 그림 8(b)의 히스토그램을 보면 이동량의 변화량에 비해 “1” 픽셀의 분산값이 조금 크고 꼬리 부분에 많은 픽셀들이 위치해 있지만 “0”분포의 변화는 거의 비슷하다. 반면, 그림 8(c)과 같이 최대값과 최소값의 변화폭은 상당히 감소하고 회전 각도와 방향에 대해서도 랜덤한 분포를 보여줌으로서 이동거리보다 약간 높지만  $3.62 \times 10^{-11}$ 이하의 낮은 raw BER을 얻었다.

### 3. 영상의 미소배율 변화에 따른 영향

본 논문에서는 미소 배율변화를 주기 위해 퓨리에 렌즈와 CMOS 카메라를 동시에 앞뒤로 이동시키면서 영상을 획득하였으며, 오버 샘플링 범위는 1 : 5.5~6.5 사이에서 수행하였다. 그림 9(a)는 CMOS 카메라에서 렌즈의 초점이나 위치 오차로 인해 서로 다른 배율로 재생된 홀로그램이다. CMOS 카메라 앞에 위치한 퓨리에 변환 렌즈가 기록매질에서 초점거리 보다 가깝게 위치한 경우 출력 영상은 축소되어 배율이 증가하는 반면 초점거리보다 멀리 위치하면 확대되어 배율이 감소한다. 그림 9(b)의 히스토그램 분포에서는 배율 감소에 따라 샘플링 영역의 축소로 인해 “0” 분포의 꼬리와 “1” 분포의 머리부분에서 인접 픽셀간의 잡음을 유발하는 성분들이 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 9(c)에서도 샘플정보의 감소로 인해 배율이 확대될 때 보다는 축소될 때 raw BER이 더 급격하게 증가하고 있다. 배율변화는 이동 및 회전 보다 시스템 성능에 가장 큰 영향을 주고 있지만, 오버 샘플링율이 1 : 5.61에서  $4.76 \times 10^{-7}$ 이하의 낮은 에러율을 얻었다. 실험 결과, 홀로그램 재생 시스템에서 가장 일반적인 영상의 이동 및 회전, 미소 배율 변화에 대해 제안된 알고리즘이 우수한 성능을 보였으며, 실제 시스템에서 발생하는 외적인 영향을 줄일 수 있었다. 또한 에러 정정을 위한 채널 코딩을 적용할 경우 보다 많은 사용자 정보를 기록하고 재생할 수 있을 것으로 기대된다.

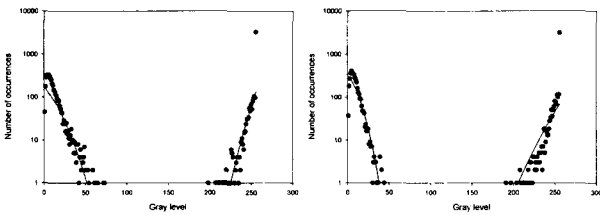


(a) 배율변화에 변화를 주며 획득된 홀로그램



배율 1 : 5.61

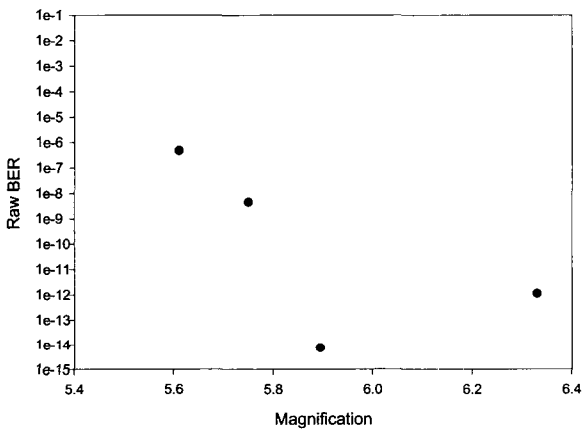
배율 1 : 5.75



배율 1 : 5.89

배율 1 : 6.33

(b) 히스토그램 분포 및 가우시안 피팅곡선



(c) 배율 변화에 따른 raw BER

그림 9. 미소 배율 변화에 따른 raw BER 성능  
Fig. 9. Raw BER versus minute magnification change.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 순수 기록 데이터와 정보 시작점 추출 및 기하학적 변형에 따른 raw BER를 줄이기 위한 참조 격자로 구성된 새로운 2차원 데이터 매트릭스를 제안하고 영상처리 알고리즘을 통해 구현하였다. 실제 오버 샘플링된 디지털 홀로그래픽 데이터를 통해 영상의 이동, 회전, 미소 배율 변화에 따른 시작점 추출 및 raw BER를 분석함으로써 실험적으로 증명하였으며, 향후 오버 샘플링 율에 따른 잡음 분포, 자동 노출 보

정 및 하드웨어 구현을 통한 실시간 재생 등이 수행될 예정이다.

제안된 새로운 데이터 구조와 알고리즘은 디지털 홀로그래픽 광메모리, 광보안 및 인증 시스템 등의 다양한 응용분야에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

[1] 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.

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

[3] A. Pu and D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer based holographic three-dimensional disks," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2389-2398, 1996.

[4] G. W. Burr, W. Chou, M. A. Neifield, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, "Experimental evaluation of user capacity in holographic data-storage systems," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 23, pp. 5431-5443, 1998.

[5] G. W. Burr and I. Leyva "Multiple phase-conjugate holographic data storage with a buffer hologram," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 499-501, 2000.

[6] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Brian G. Schunck, *Machine vision*, McGraw-Hill, Chapter 2, 1995.

[7] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, and John R. Buck, *Discrete-time signal processing* 2nd ed. Prentice Hall, pp. 746-748, 1999.

[8] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital*



Image Processing, Addison Wesley, pp. 514-517, 1993.

[9] Hans J. Coufal, Demetri Psaltis, Glenn T. Sincerbox, Holographic Data Storage, Springer, pp. 92-99, 2000.

[10] Maria-P. Bernal, Geoffrey W. Burr, Hans Coufal, and Manuel Quintanilla, "Balancing in-

terpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems," Appl. Opt., vol. 37, no. 23, pp. 5377-5385, 1998.

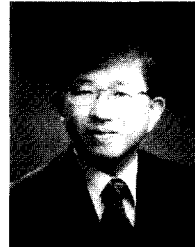
[11] Erwin Kreyszig, Advanced engineering mathematics 8th ed, Wiley, Chapter 23, 1999.

저 자 소 개



최 재 광(정회원)  
 1999년 2월 순천대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 2003년 2월 충북대 정보통신공학과 졸업(공학석사)  
 2000년 ~ 현재 (주)프리즘테크 연구원

<주관심분야 : 광신호처리, 회절광학소자, 머신비전>



김 남(정회원)  
 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사).  
 1983년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
 1988년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사).

1992년 8월 ~ 1993년 8월 : 미 Stanford 대학 방문교수.  
 2000년 3월 ~ 2001년 2월 : 미 Caltech 방문교수  
 1989년 ~ 현재 : 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수  
 <주관심분야 : 광신호처리, 회절광학소자, 홀로그래픽 메모리, 비선형 광학>



김 정 회(학생회원)  
 1997년 2월 순천대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1999년 2월 충북대 정보통신공학과 졸업(공학석사)  
 1999년 ~ 현재 충북대 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 광신호 처리, 패턴 인식, 광보안 시스템, 홀로그래픽 메모리>

