

반사형 강유전성 액정 공간 광 변조기를 이용한 CGH의 양자화 방법에 따른 재생 특성 비교

최한섭 · 유연석
청주대학교 광학공학과

(1998년 7월 30일 받음, 1999년 1월 7일 수정본 받음)

본 연구에서는 연속적인 세기 분포를 갖는 CGH 패턴을 두 가지 서로 다른 방법으로 이진화를 하고 그 패턴을 LCSLM (liquid crystal spatial light modulator)에 적용하여 재생 특성을 비교해 보았다. 이진화 방법으로는 에러확산 알고리즘과 직접 양자화 방법을 사용하였다. 재생 특성 비교에 사용한 인자들은 전체 밝기 평균, 평균 제곱 에러, 그리고 회절 효율이다. 실험에 사용한 LCSLM은 256×256 점들을 가지고 87% fill factor와 $15 \mu\text{m}$ pixel pitch를 가지는 이진의 전기적으로 어드레스되는 반사형 강유전성 액정 공간 광 변조기이다.

I. 서 론

CGH(computer-generated hologram)는 많은 영역에서 광학적인 방법에 의한 데이터의 조작을 가능하게 해 준다. 이러한 CGH의 특징은 물체가 실제로 존재하지 않아도 제작이 가능하며 광학계의 불완전성 및 진동, 감광재료의 비선형성 및 입자성 등의 물리적 제약 조건의 영향을 받지 않으며, 임의의 파면을 합성할수 있다는 장점을 가지고 있어 3차원 디스플레이, 광 데이터 처리, 광학 소자의 검사, 광 메모리, 그리고 레이저 빔 스캐닝 등에서 널리 사용된다.^[1]

광학적인 것으로부터 컴퓨터 시스템으로의 데이터의 전달 과정에서는 샘플링이 사용되고 컴퓨터로부터 광학적 시스템으로의 데이터의 전달 과정에서는 양자화가 사용되어진다. 몇가지 양자화 알고리즘들이 개발되어져 왔다. 그것들 중에는 dither,^[2] error diffusion,^[3] minimal average error,^[4] iterative Fourier transform,^[5] simulated annealing,^[6] threshold acceptance,^[7] neural net,^[8] 그리고 fuzzy logic^[9] 알고리즘 등이 있다.

이들 중에서 에러 확산 알고리즘은 연속적인 명암의 데이터를 불연속적인 매질에 사용할수 있도록 해 주는 알고리즘이다. 좀더 일반적으로 말하면 N-단계의 신호를 n-단계로 매질에 표현하는 것이다. 여기에서 N은 256 또는 더 큰 단계의 차수가 될 수 있고 n은 2에서 8사이 단계의 차수가 될 수 있다. 여기에서 각 픽셀들은 이미 처리된 픽셀들의 양자화 에러에 의해 영향 받는다. 이 알고리즘들은 상들을 이진화 하기 위해 개발되어져 실수값을 갖는 홀로그램 분포의 이진화를 위해 CGH에 적용되어졌으며 후에 복소값을 갖는 홀로그램 분포의 양자화에도 적용될수 있도록 수정되어졌다. 또한 보다 간단한 양자화 방법중의 하나로 직접 양자화 방법이 있는데, 이것은 에러 확산 알고리즘을 조금더 간략화시킨 형태이다.

CGH를 제작하는 과정에서 물체의 파면은 수학적 함수 형태로 주어지거나 또는 어떤 점들의 배열로 주어지게 된다. 컴퓨터로 주어진 물체에 대한 진폭 투과도를 계산할수 있고 만

들어진 CGH 패턴을 양자화하여 종이에 출력하거나 또는 SLM(spatial light modulator)과 같은 표시장치에 출력하게 된다. CGH를 실시간적으로 표현할수 있는 장치중의 하나인 액정 공간 광 변조기(LCSLM)는 액정의 성질을 이용하여 픽셀 단위로 "on", "off"를 수행하여, 공간적으로 광을 변조시키는데 사용되어지는 장치이다. 이 장치는 대표적으로 twisted nematic 방식과 ferroelectric 방식이 있는데 전자는 gray level 값을 표현할수 있는 장점이 있지만 픽셀의 크기가 아직은 후자의 방식보다는 크고, 후자는 단지 이진값만을 표현할 수밖에 없지만 픽셀의 크기가 상대적으로 전자의 것보다는 작다. 이 장치들은 신호 처리, 패턴 인식, 그리고 빔 조절과 같은 작업을 수행하기 위한 많은 광학적 시스템에서 유용하게 파면의 위상 또는 세기를 공간적으로 변조시킬 수 있다. 이 LCSLM은 CGH의 발전에 있어 날로 증대되는 real-time 기록 매질의 필요성에 대하여 간편하면서도 사용하기 쉬운 특성을 가진 장치로 여러 방면으로 연구되어 지고 있다.^[14] 또한 액정을 이용한 SLM은 자기광학을 이용한 SLM이나 음향광학을 이용한 SLM보다 상용화된 제품들이 많기 때문에 여러 곳에서 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 LCSLM을 이용한 CGH의 구현으로서 기존의 투과형 광학계와 LCSLM을 이용한 연구와는 다르게 새로운 반사형 LCSLM을 이용한 광학계를 사용하여 CGH를 구현하고 상을 재생하였다. 이것은 CGH 시스템이라든지 또는 광학적 패턴 인식, 디스플레이 시스템등에 관한 기초 연구가 될 수 있다고 생각한다.

본 연구에서는 직접 양자화 방법과 Barnard^[13]에 의해 최적화된 확산 계수를 가지는 에러 확산 알고리즘을 이용하여 CGH 패턴을 제작하여 전산시뮬하여 결과를 비교해보고, 제작된 패턴을 실시간 처리가 가능한 256×256 픽셀들을 가지는 반사형 강유전성 액정 공간 광 변조기를 가지고 반사형 광학계를 통하여 광학적으로 재생해 보았다. 그리고 제작된 CGH들은 전체 밝기, 평균 제곱 에러, 회절 효율을 사용하여 그 성능을 비교해 보았다.

II. Pixel-oriented CGH

Pixel-oriented CGH는 cell-oriented CGH와는 달리 cell내에 개구를 가지고 있지 않고 각각의 cell들을 열거나 닫힌 상태로써 CGH의 투과도 함수를 표현한다. 또한 재생시에 진폭과 위상을 동시에 변조시키지 못하는 경우에는 공간 캐리어 함수를 사용하여 변조해야 할 필요가 있게된다. Pixel-oriented 후리어 홀로그래를 만드는 절차는 복소 함수의 계산, 공간 캐리어의 변조, 바이어스 함수의 추가, 이진화 처리의 4단계로 나눌 수 있다.

복소 물체 분포 $u(x,y)$ 를 만들기 위해 실수값 물체 분포 $o(x,y)$ 에 임의의 위상 분포 $\Phi(x,y)$ 를 곱한다

$$u(x,y) = o(x,y) \exp[i\Phi(x,y)] \tag{1}$$

여기에서 모든 $|x| \geq \Delta x/2$, 그리고 $|y| \geq \Delta y/2$ 에 대해 $o(x,y) = 0$ 이다. 크기 Δy , Δx 의 이 물체분포는 크기 ΔX , ΔY 의 물체 평면에 위치된다. 물체 평면 내부에 있는 물체 분포의 실제 위치는 재생상의 위치를 결정한다.

물체 데이터를 샘플링 하여 후리어 변환한 계산된 값들을 또다시 샘플링 한 것을 복소 함수 $U(\mu, \nu)$ 라 하자. $U(\mu, \nu)$ 에 캐리어 함수를 써서 진폭과 위상을 변조하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다

$$U_M(\mu, \nu) = |U(\mu, \nu)| \cos [2\pi(x_0\mu + y_0\nu) + \phi(\mu, \nu)] \tag{2}$$

여기에서 $|U(\mu, \nu)|$ 는 $U(\mu, \nu)$ 의 진폭이고 $\phi(\mu, \nu)$ 는 $U(\mu, \nu)$ 의 위상이다. 바이어스 함수

$$b(\mu, \nu) = -\min U_M(\mu, \nu) \tag{3}$$

를 써서 CGH의 진폭 투과도로 U_H 를 구한다,

$$U_H = U_M(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \geq 0 \tag{4}$$

그리고 (3)식에서 \min 은 $U_M(\mu, \nu)$ 의 최소값을 나타낸다.^[10]

만약 위상형 CGH의 경우에는 (2)식은 다음과 같이 쓸 수 있다

$$U_M(\mu, \nu) = C \exp[i\phi(\mu, \nu)] \tag{5}$$

여기에서 C 는 상수이다. 즉, 위상값만을 변조시켜 CGH가 제작되게 된다.

이러한 홀로그래피 평면파에 의해 조사되어지면 물체 $u(x,y)$ 는 렌즈의 후리어 평면에서 offset x_0, y_0 인 비축상에 나타날 것이다. offset은 재생시에 발생하는 원하지 않는 항으로부터 물체 분포 영역 $u(x,y)$ 를 분리시키기 위해 충분히 커야한다. 결과적으로 실수이고 음수가 아닌 양으로 표현된 $U_H(\mu, \nu)$ 는 에러 확산 알고리즘을 통해 LCSLM에 적용될 수 있도록 이진화가 된다.

III. 양자화 알고리즘

CGH가 제작되기 전에, CGH의 진폭 투과도를 나타내는 함수 또는 그 복소 파면 그 자체는 반드시 디지털화 되어야만

한다. 디지털화 한다는것은 첫째로 규칙적인 간격으로 함수를 샘플링 하는 것과 샘플된 값들을 유한한 수의 단계들로 각각 양자화 하는 것을 말한다. 샘플링 처리를 만약 충분히 높은 비율로 수행한다면, 원래의 함수에 대한 정보의 손실을 입지 않을 것이다. 그러나, 샘플된 값들이 양자화 되었을 때, 피할수 없는 에러들이 원래 함수에 더해지게 된다. 이러한 양자화 노이즈는 홀로그래피로부터 재생된 파면의 정확성에 영향을 끼친다.

본 연구에서는 CGH의 광학적 구현을 위해 사용된 매질인 강유전성 액정 공간 광변조기가 두 가지 상태로 밖에 동작할 수 없기 때문에 직접 양자화 방법과 에러확산 알고리즘을 이용한 양자화 방법들을 사용하여 이진화를 시켜주었다.

이 두가지 양자화 방법의 장단점을 살펴보면 첫째로 직접 양자화 방법은 구현하기가 쉽고 어떤 특정한 스펙트럼 분포를 가진 것을 양자화 할 때(주기적으로 변화하는 격자 모양등과 같이)에는 다른 것보다 양자화 에러가 적게 발생한다는 장점을 갖고 있다. 단점으로는 만약 위와 같은 특정한 스펙트럼 분포가 아닌경우에는 양자화 시키기 전의 패턴과 판이하게 달라져 아주 큰 양자화 에러를 발생시킬수도 있다는 점이다. 둘째로 에러확산알고리즘의 장점은 직접 양자화 방법을 보완한 것으로 어떤 특정한 스펙트럼 분포 뿐만이 아니라 일반적인 경우에 있어서도 일정한 양자화 에러값을 보인다는 것이다. 또한 직접 양자화 방법으로 만든 재생상 보다 더욱 재생상의 모서리 부분의 날카로움이 향상된다는 점을 들을수 있다. 반면에 구현하기가 힘들고 재생상에서 알고리즘 특유의 노이즈 구름(일정한 모양)을 만드는 단점을 갖고 있다.^[11-13]

3.1. 직접 양자화 방법

이 방법에서는 그림 1에 묘사된 것처럼 입력 값들은 몇 개의 저장고 속으로 나뉘어진다, 그리고 특정한 출력값이 각각의 위치에 할당된다. 이 방법의 가장 극단적인 예는 이진 양자화의 경우이다. 이 경우는 보통 문턱치값으로 0.5를 갖고 입력값들은 0과 1사이에 존재한다, 입력값들이 문턱치값인 0.5이하이면 출력값은 0이 할당되고, 문턱치값 이상이면 1이

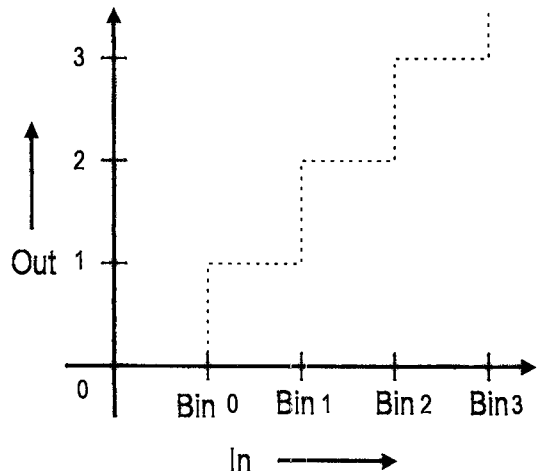


그림 1. 직접 양자화 방법의 개념도.

할당된다. 이런 식으로 연속적인 세기 분포를 가지는 값들을 이진화하게 된다.^[13]

3.2. Error diffusion algorithm

그림 2에 묘사된 1차원 에러 확산 알고리즘의 기본 개념에 대해 알아보자. 어떤 입력값 $i(n)$ 을 일정한 문턱치값 t 와 비교한다. 문턱치값보다 크면 1, 작으면 0으로 정의한다. 이렇게 정의된 값을 $b(n)$ 이라 하자. 이 처리 과정에 의해 에러값 $e(n)$ 은 $e(n)=b(n)-i_{mod}(n)$ 로 정의된다. 수정된 입력값은 $i_{mod}(n)$ 으로 다시 표기된다. 다음 입력값 $i(n+1)$ 은 $i_{mod}(n+1)=i(n+1)-e(n)$ 을 통해 수정된 입력값 $i_{mod}(n+1)$ 로 바뀐다. 이 수정된 입력값을 다시 문턱치값 t 와 비교한다. 그리고 다시 위의 과정을 반복한다. 여기에서 문턱치값은 보통 일정한 상수값이 쓰이는데 본 연구에서는 입력값을 일반화시켜 그 반을 문턱치값으로 사용하였다.

2차원 에러 확산 알고리즘에서는 수정된 입력을 다음과 같이 쓸수 있다

$$i_{mod}(m, n) = i(m, n) - \sum_{k,l \in S} a_{k,l} [e(m-k, n-l)] \quad (6)$$

여기에서 그 에러는 일반적으로 $Ma_{k,l}=1$ 을 가지는, 에러 배치 가중치 $a_{k,l}$ 을 사용함에 의해 영역 S 전체로 2차원 적으로 분포된다. 그 결과인 이진 분포는 다음처럼 한계치를 통해서 얻어진다

$$b(m, n) = step [i_{mod}(m, n) - t] \quad (7)$$

여기에서, $step$ 함수는 그것의 독립변수가 음일 때는 0으로 정의되고, 양 또는 영일 때는 1로 정의된다. 또한 에러 확산 알고리즘에서 에러는 다음처럼 계산된다

$$e(m, n) = b(m, n) - i_{mod}(m, n) \quad (8)$$

또, 식 (6)과 (8)로부터 다음을 구할 수 있다

$$b(m, n) = i(m, n) - \sum_{k,l \in S} a_{k,l} [e(m-k, n-l)] + e(m, n) \quad (9)$$

즉, 2차원 에러확산 알고리즘은 1차원 에러 확산 알고리즘과는 달리 에러값이 이 알고리즘이 적용되는 픽셀 주위로 확산한다는 것이다.

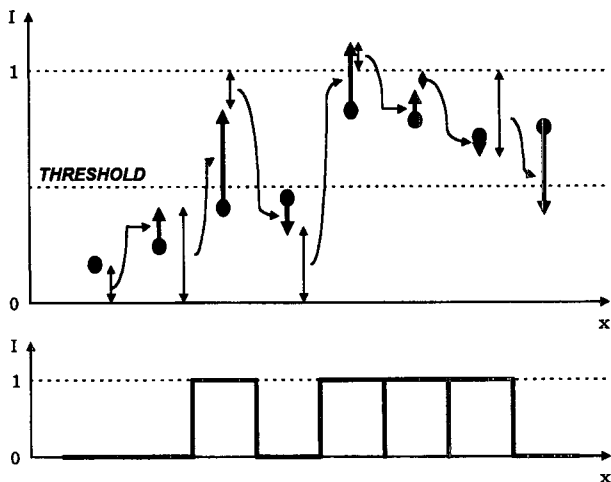


그림 2. 1차원 에러 확산의 기본 개념.

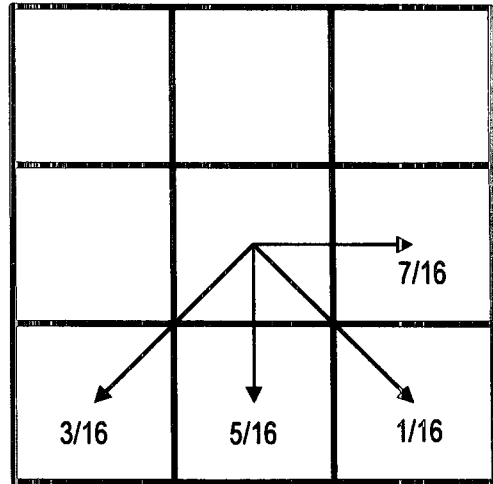


그림 3. Floyd와 Steinberg에 의해서 사용된 2차원 에러 확산 계수들.

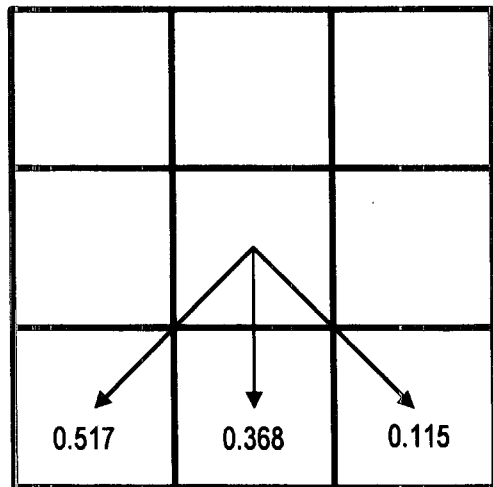


그림 4. 최적화된 2차원 에러 확산법의 확산 계수들.

산한다는 것이다. 주변으로 확산되는 에러값의 비율에 따라 여러 가지 다른 방법들이 존재한다.^[11]

기본적인 ED 알고리즘을 변형한 2차원 에러 확산 알고리즘에는 다음과 같은 방법들이 있다. Floyd, Steinberg에 의한 에러 확산 알고리즘,^[3] Hauck, Bryngdahl에 의해 제안된 에러 확산 알고리즘,^[12] 그리고 Barnard에 의한 컴퓨터 발생 홀로그램에 대한 최적의 에러확산 알고리즘^[13] 등이다. 그림 3은 Floyd, Steinberg 방법의 개념을 설명하는 것이고 그림 4는 Barnard 방법의 개념을 나타낸다. 본 연구에서는 Barnard 방법을 사용하여 전산시능을 수행하였고 이 방법으로 만들어진 CGH 패턴을 전기적으로 제어가 가능한 LCSLM을 이용하여 광학적으로 재생하였다.

IV. 강유전성 액정 공간 광 변조기

본 연구에서는 FLC(ferroelectric liquid crystal)로 제작된 이

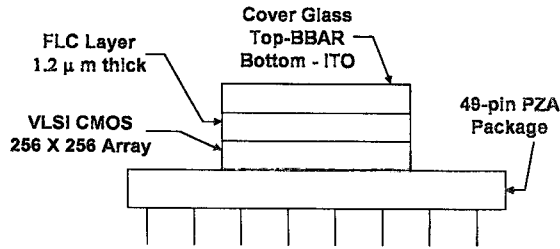


그림 5. 반사형 SLM의 단면.

진 반사형 공간 광 변조기(SLM)를 사용하였다. 그림 5는 완전한 반사형 FLC SLM의 다양한 부분들을 보여준다. FLC 물질의 얇은 층이 금속 전도체와 indium tin oxide (ITO)와 같은 투명한 전도층이 코팅된 유리 사이에 끼워져 있다. 광의 변조를 수행하는 영역은 256×256 사각 배열로 배치된 개별적으로 어드레스로 불러낼 수 있는 65,536개의 표준 SRAM cell들로 구성된 pixelated 배열이다. 이 배열의 “fill factor”는 배열의 전체 영역에 대해 금속으로 덮여진 영역의 비율로서 정의되고 이 장치에서는 87%이다.^[14, 15]

V. 실험 및 결과

CGH에 최적화된 에러 확산 알고리즘과 직접 양자화 방법을 사용하여 CGH 패턴을 계산하였다. 구해진 CGH 패턴에서의 재생상을 전산시능으로 먼저 수행하였다. 계산된 결과와 광학적 재생 특성을 비교해 보기 위해 SLM을 이용한 광학적인 실험 장치를 구성하여 실제로 상을 재생시켜 보았다. 그리고 각각의 방법에 따른 CGH의 특성들을 비교 분석하였다.

5.1. 전산시능

전산시능에 사용된 언어는 볼랜드 C++ V5.0이고, 입력 영상으로는 이진 1 bit 윈도우즈 비트맵 파일을 이용하였다. 이 비트맵 파일의 크기는 (256, 256)이고 여기에 (64, 64) 크기의

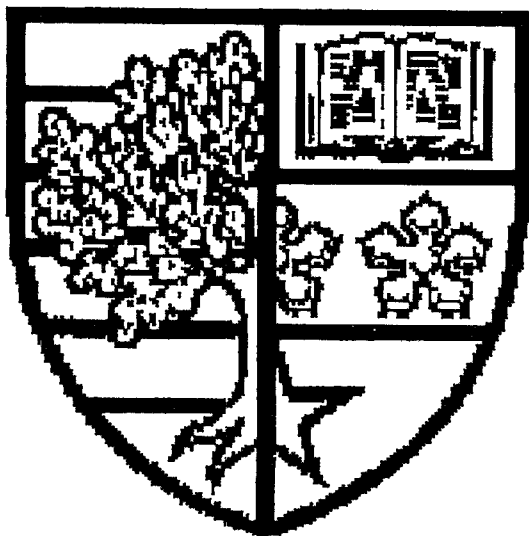


그림 6. 입력 영상(64×64.2, 2 color).

입력상을 삽입했다. 그림 6은 입력영상을 나타낸다. 이 진폭형 물체에 임의의 분포를 가지는 임의의 위상값들을 발생시켜 곱해 복소 물체로 만들었다. 2차원 고속 후리어 변환을 수행해 후라운호퍼 회절 영역에서의 진폭값과 위상값을 구했으며 이 값들을 식(2)와 식(5)에 적용시켜 CGH를 제작했다. 제작한 pixel 발생 방식을 진폭형과 위상형으로 나누어 여기에 에러 확산 알고리즘과 직접 양자화 방법을 적용시켜 CGH를 제작했다. 제작된 CGH를 역 후리어 변환을 하여 계산적으로 재생상을 얻었다. 여기에서 CGH와 계산적으로 구현한 재생상은 8 bit 윈도우즈 비트맵 파일로 출력했다.

전체 밝기, 평균 제곱 에러는 CGH의 성능을 평가할 수 있는 인자이다. 이것들이 다른 이진화 방법으로 만들어진 CGH를 비교하기 위해 사용되었다. 첫번째 방법은 평균 제곱 에러로 MSE(mean square error)로 표기했으며 다음과 같은 식을 이용하여 계산되었다.^[16]

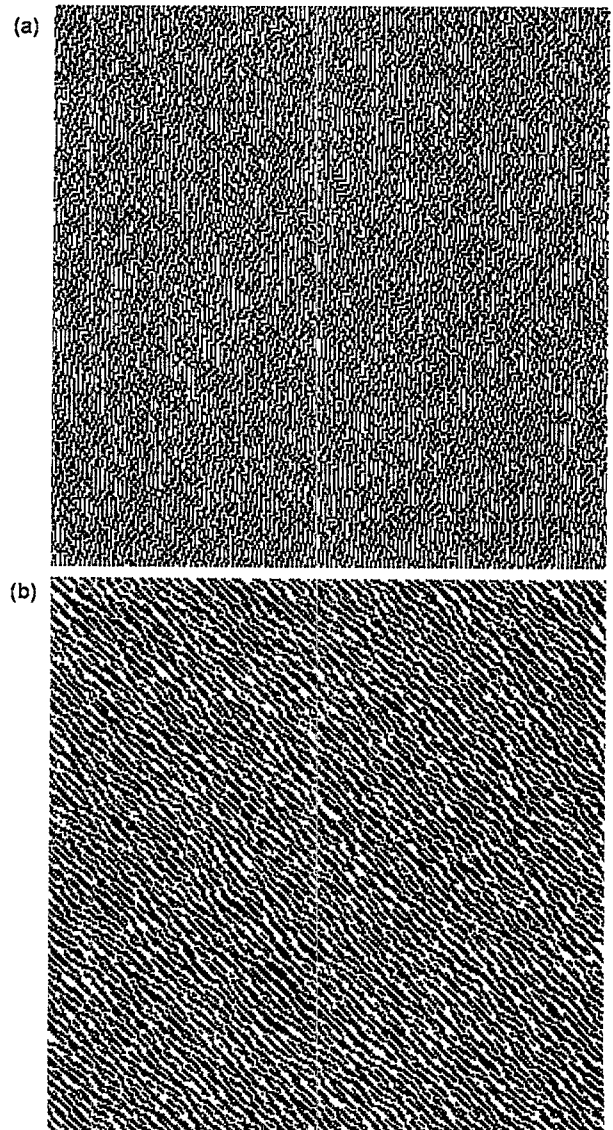


그림 7. CGH 패턴 (a)에러확산 알고리즘 사용 (b) 직접양자화 방법 사용.

$$MSE = \frac{1}{XY} \sum \sum |h(x,y) - \alpha g(x,y)|^2 dx dy \quad (10)$$

여기에서 $g(x,y)$ 는 구하고자 하는 상이고, $h(x,y)$ 는 실제 재생된 상이다. 그리고 α 는 비율 인자이다. 만약 에러를 가지지 않는 이상적인 방법으로 CGH에 복수파면이 기록된다면 구하고자 하는 원래의 상이 얻어질 것이다.

비교에 사용된 두번째 방법은 재생면의 영역 R 에 걸쳐 그 밝기 $B(x,y)$ 를 더함으로서 계산된 재생신호의 전체 밝기 평균 B 이다:

$$B = \frac{1}{XY} \int \int_{(x,y) \in R} B(x,y) dx dy \quad (11)$$

또한 이 B 값을 입력 세기의 평균값으로 나누어 주면 근사적인 회절 효율값을 전산시능으로서 쉽게 구할 수 있다.

그림 7은 이진 형태로 양자화된 CGH 패턴을 나타낸다. 이것은 후리어 영역에서의 스펙트럼 분포를 서로 다른 이진화 방법으로 양자화한 것으로 이 패턴 그대로 반사형 SLM에 적

용되어져 광학적인 재생에 이용된다.

그림 8은 식 (2)를 사용하여 만들어진 CGH 패턴을 역후리어 변환하여 전산시능으로 재생한 재생상을 나타낸다. 이것은 에러확산알고리즘을 적용한 것과 직접양자화방법을 적용한 것과의 차이점을 분명하게 나타내 준다. 그림에서 보면 양자화 노이즈 분포가 에러확산 알고리즘을 사용했을 경우, 물체가 나타나는 영역과 노이즈 영역과의 분포가 확실하게 구분된다. 그리고 직접양자화 방법을 사용했을 경우에는 노이즈 영역이 물체가 재생되는 부분 전체에 걸쳐 발생하는 것을 볼수 있다.

그림 9는 식 (5)를 사용하여 만들어진 CGH 패턴을 역후리어 변환하여 전산시능으로 재생한 재생상을 나타낸다. 이 경우에 있어서는 위상값만을 가지고 제작한 CGH 패턴을 사용하였기 때문에 에러확산알고리즘을 사용하였을 경우에는 위의 경우와는 다르게 양자화 노이즈가 분포된다. 그러나 직접양자화 방법을 사용하였을 경우에는 별로 차이가 나지 않았다.

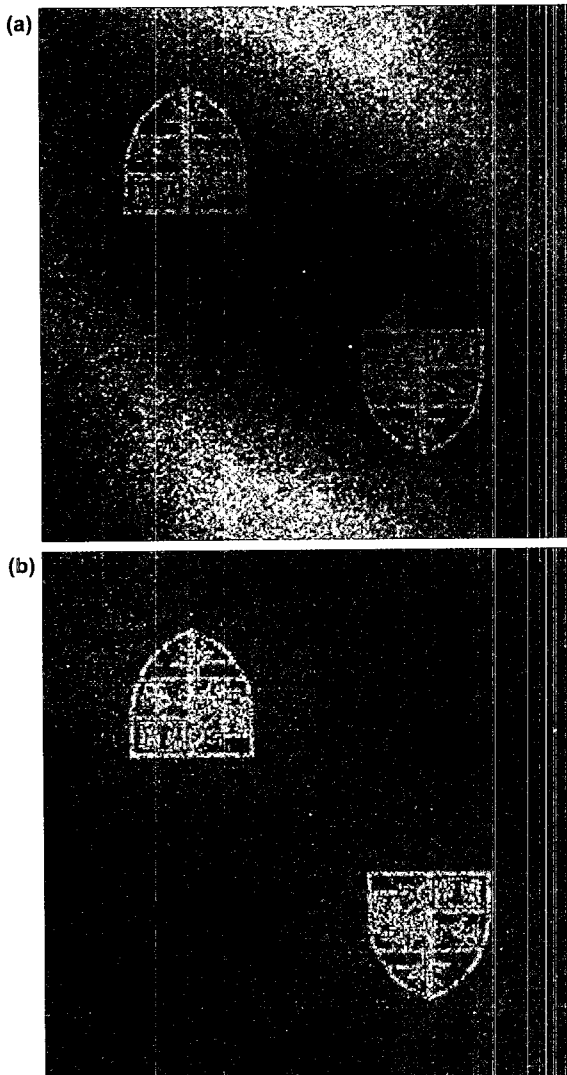


그림 8. 진폭형으로 전산시능한 재생상 (a) 에러확산 알고리즘 사용 (b) 직접양자화 방법 사용.

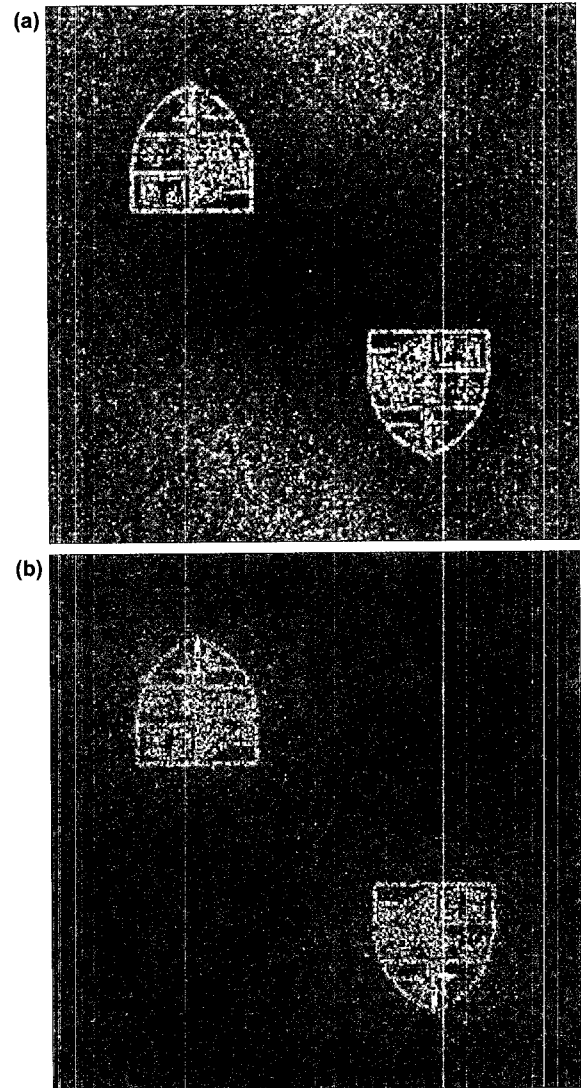


그림 9. 위상형으로 전산시능한 재생상 (a) 에러확산 알고리즘 사용 (b) 직접양자화 방법 사용.

5.2. 광학적 재생

광학적인 재생 장치의 구성을 그림 10에 나타내었다. He-Ne 레이저에서 나온 광을 공간 필터를 거쳐 렌즈 1에 의해 광속을 확대 하였다. 편광 빛살 가르개(PBS) 투과해 SLM(DISPLAYTECH 사)면에 입사된다. 이때 SLM에는 위상형 또는 진폭형으로 계산된 CGH 패턴이 있게 된다. 광파는 CGH 패턴의 형상에 따라 SLM에 의해 변조된 파면 형태로 반사된다. 반사된 빛은 다시 편광 빛살 가르개에서 반사된 후 렌즈 2(후리어 변환 렌즈: $f=300\text{ mm}$)로 입사된다. 재생상은 렌즈 2의 후리어 평면상에서 관찰하게 된다. 여기에서 선 편광자는 광량을 조절하고 노이즈를 제거하기 위해 사용했다. 렌즈의 후리어 평면상에 설치한 카메라를 사용하여 재생상을 기록하였다. 그리고 파워 미터(Spectra Physics, 404)를 사용해 입사광과 회절된 광의 세기를 측정해 회절 효율을 계산하였다.

그림 11과 그림 12는 그림 10의 실험 장치에 의해서 만들어진 재생상을 나타낸다. 그림 11은 진폭형 SLM을 사용하여 만들어진 재생상을 카메라를 사용하여 기록한 상으로서 그림 (a)는 에러확산 알고리즘을 사용하여 이진화한 CGH패턴의 재생상을 나타낸다. 그림을 보면 이 알고리즘 특유의 양자화 노이즈 분포가 재생상과 거의 분리되어 존재함을 알 수 있다. 그림 (b)는 직접양자화 방법을 사용하여 이진화한 CGH패턴의 재생상을 나타낸다. 그림을 보면 재생상의 주위에 양자화 노이즈가 분포하지만 재생상의 밝기에 비해 무시할만한 수준이라는 것을 알 수 있다. 그림 12는 위상형 SLM을 사용하여 만들어진 재생상으로서 그림 12(a)는 에러확산 알고리즘을 사

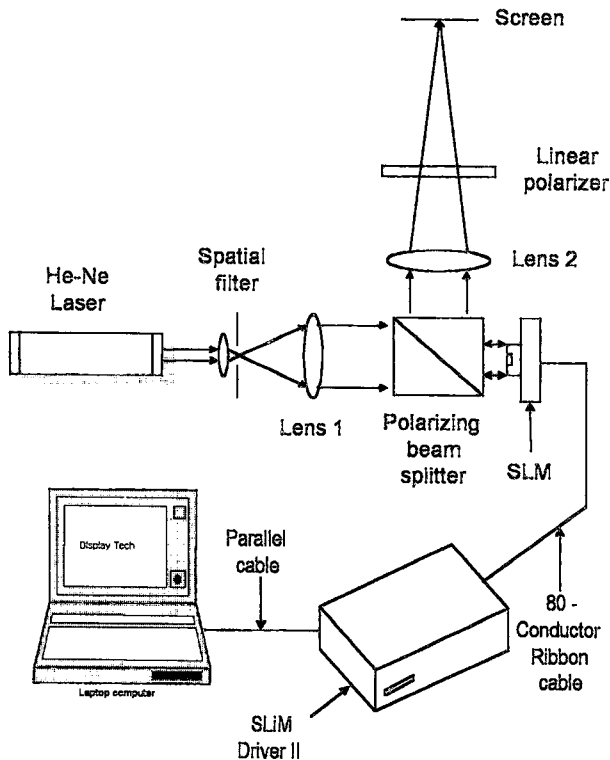
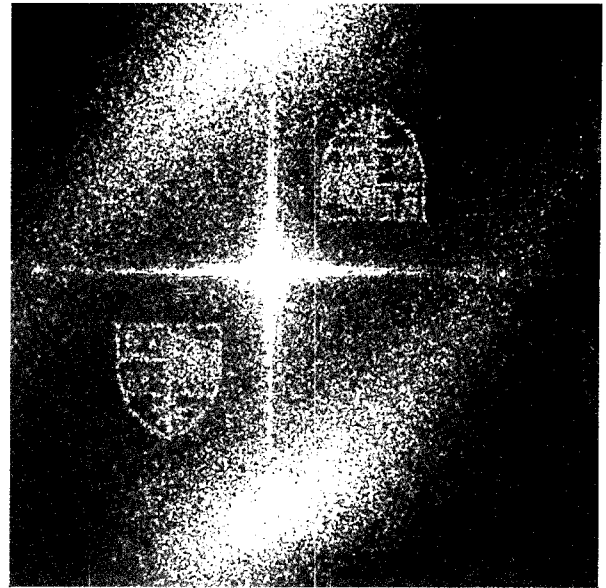
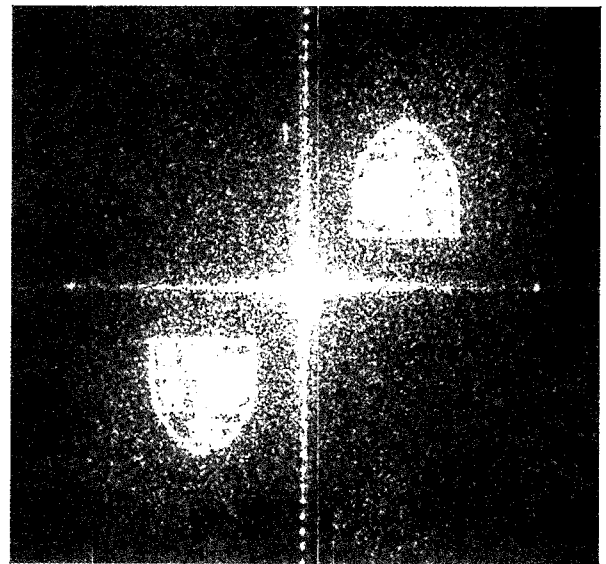


그림 10. 실험 장치도.



(a)

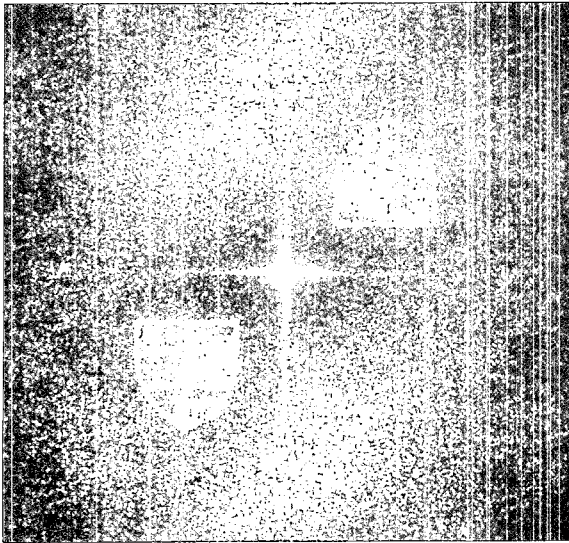


(b)

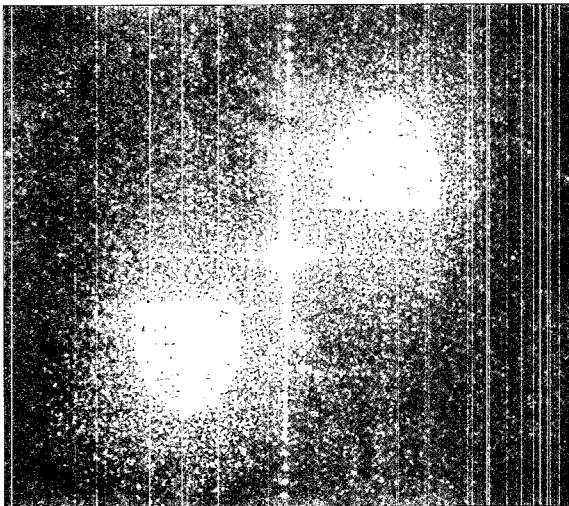
그림 11. 진폭형 SLM을 이용하여 재생한 상 (a) 에러확산 알고리즘 사용 (b) 직접양자화방법 사용.

표 1. 양자화 방법에 따른 평균제곱에러, 전체 평균 밝기, 회절 효율

	에러확산 알고리즘	직접양자화 방법
진폭형	평균제곱에러	2.993643
	전체 밝기 평균	3.494654
	회절효율(전산시뮬)	1.37(%)
	회절효율(실제측정)	0.36(%)
위상형	평균제곱에러	2.882838
	전체 밝기 평균	3.692745
	회절효율(전산시뮬)	1.45(%)
	회절효율(실제측정)	0.65(%)



(a)



(b)

그림 12. 위상형 SLM을 이용하여 재생한 상 (a) 에러확산알고리즘 사용 (b) 직접양자화방법 사용.

용하여 이진화한 CGH패턴의 재생상을 나타낸다. 그림을 보면 이 알고리즘 특유의 양자화 노이즈 분포에 재생상이 분리되지 못하고 포함되어 나타난다는 것을 알 수 있다. 그림 12(b)는 직접양자화 방법을 사용하여 이진화한 CGH패턴의 재생상을 나타낸다. 그림을 보면 진폭형 코딩과 비슷하게 양자화 노이즈가 발생하고 특별한 차이점은 보이지 않는다. 두 방법의 결과들을 보면 전산시능으로 구한 재생상과 광학적 재생상이 거의 같은 영상을 보여줌을 알 수 있다. 광학적 재생상에서만 나타나 있는 zero 차수 영역의 “+” 모양의 회절상은 SLM의 격자형 구조에 기인한 것으로 생각된다.

표 1은 재생방법에 따라 전산시능한 결과와 실제 광학적인 재생장치(진폭형 SLM, 위상형 SLM)를 사용하여 측정된 값을 비교해 보여준다. 이 결과를 보면 각 방법에 대한 장단점을 비교해 볼 수 있다. 회절 효율값들을 비교해 보면 전산 시

능으로 계산한 회절 효율들이 반사형 재생 광학계를 이용해 광학적으로 측정된 회절효율보다 상당히 좋은 회절 효율값을 보이는데 이 차이는 재생상을 포함한 어떤 일정한 영역에 대해서 전산 시능을 수행하여, 이진화시 발생한 양자화 노이즈가 함께 들어가 회절 효율로 계산되었기 때문이다. 그렇지만 이것을 구별하여 전산 시능할 수는 없었다. 또 여기에는 사용된 재생 장치의 특성에 따른 문제에 관해서는 고려되지 않았다. 광학적인 실험장치를 통해 측정된 회절효율값들을 비교해 보면 에러확산 알고리즘을 사용하였을 경우보다 직접양자화 방법을 사용하였을 경우가 두배가량 좋은 것을 알 수 있다. 또한 진폭형 SLM을 사용한 것보다는 위상형 SLM을 사용한 경우가 두배가량 좋아짐을 알 수 있는데 이것은 실험에 사용한 SLM의 성능과 밀접한 연관 관계가 있을 것이다. 다른 종류의 SLM 또는 기록 물질(silver halide film, photoresist film 등)을 이용할 경우에는 상당히 유동적으로 변할 수 있는 항목이다. 그리고 전산시능으로 구한 전체 밝기 평균값은 에러확산 알고리즘을 사용하였을 경우 위상형 코딩에서 두배가량 좋아지지만 직접양자화 방법을 사용하였을 경우에는 다소 개선되는 정도였다. 재생상의 질을 평가할 수 있는 항목인 평균 제곱 에러를 비교해 보면 에러확산 알고리즘을 사용했을 경우가 직접 양자화 방법을 사용하였을 경우보다 작다. 즉, 더 안정된 분포를 보인다는 것이다. 위상형 코딩으로 만들어진 경우보다 진폭형 코딩을 이용하였을 경우가 두배정도 더 작은 값을 보이고, 직접양자화 방법을 사용하였을 경우는 이 값이 비슷하였지만 오히려 위상형 코딩을 사용하였을 경우가 조금 더 작은 값이 나왔다.

VI. 결 론

세기만을 가지는 물체 분포에 랜덤 위상을 적용하여 복소 물체 분포를 만든 후 후리어 변환하여 구한 연속적인 값을 가지는 공간 주파수 성분들을 두가지 양자화 방법(에러확산 알고리즘, 직접양자화 방법)을 사용하여 이진화된 CGH를 구현하였다. 계산된 CGH 패턴을 반사형 이진 액정 공간 광 변조기를 사용하여 광학적으로 재생하였다. 또한 전체 밝기 평균, 평균 제곱 에러, 그리고 회절 효율 값을 통해 성능을 평가하였다. 반사형 이진 액정 공간 광 변조기를 사용하여 얻은 회절효율은 진폭형 SLM을 사용하였을 때 에러확산 알고리즘에서 0.13%, 직접 양자화 방법에서 0.36%이고, 위상형 SLM을 사용하였을 때는 에러확산 알고리즘에서 0.29%, 직접 양자화 방법에서 0.65%의 회절효율을 얻을 수 있었다.

에러확산 알고리즘을 사용한 경우는 회절 효율과 밝기가 더 떨어지지만 평균 제곱 에러값이 낮은 안정된 상을 얻을 수 있고, 직접양자화 방법을 사용한 경우는 높은 회절 효율 값을 보이지만 평균 제곱 에러값이 높다. 따라서, 만일 gray level의 입력상을 CGH화 한다 하면 에러확산 알고리즘이 유리할 것이고, 단순한 이진 입력상을 사용하고 높은 회절효율을 요구하는 작업에서는 직접양자화 방법으로 양자화 하는 것이 유리할 것으로 보여진다.

참고문헌

- [1] 장준성, *New Physics*, **13**(2), 41 (1973).
[2] B. E. Bayer, *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Conference Record*, 26 (1973).
[3] R. W. Floyd, and L. Steinberg, *Proc. Soc. Inf. Disp.* **27**, 75 (1976).
[4] M. R. Schroeder, *IEEE Spectrum*. 66 (1969).
[5] M. Broja, F. Wyrowski and O. Bryngdahl, *Opt. Comm.* **69**, 205 (1989).
[6] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach and D. E. Sweeney, *Appl. Opt.* **26**, 2788 (1987).
[7] G. Dueck and T. Scheuer, *J. Comp. Phys.* **90**, 161 (1990).
[8] T. Tuttband, O. Bryngdahl, *Optics Comm.* **99**, 25 (1993).
[9] Y. C. Hsueh, M. G. Chern and C. H. Chu, *Comput. Graphics*, **15**, 397 (1991).
[10] Richard Hauck, Olof Bryngdahl, *J.O.S.A. A*, **1**(1), pp. 5-10, January, 1984.
[11] Reiner Eschbach, Zhigang Fan, *Appl. Opt.* **32**(17), 3130 (1993).
[12] Reiner Eschbach, *Appl. Opt.* **30**(26), 3702 (1991).
[13] Etienne Barnard, *J.O.S.A. A*, **5**(11), 1803 (1988).
[14] Uzi Efron, *Spatial Light Modulator Technology*, Marcel Dekker, Inc., 1995.
[15] Douglas J. Mcknight and Kristina M. Johnson, Royltn A. Serati, *Opt. Lett.* **18**(24), 15 (1993).
[16] Hamid Farhoosh, Michael R. Feldman, Sing H. Lee, Clark C. Guest, Yeshaiahu Fainman, and Reiner Eschbach, *Appl. Opt.* **26**(20), 4361 (1987).

A comparison of reconstruction characteristics according to the quantization method of the CGH using a reflective ferroelectric liquid crystal spatial light modulator

Han-Seop Choe and Yeon-Serk Yu

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received July 30, 1998, Revised manuscript received January 7, 1999)

In this paper, we made CGH patterns that had continuous amplitude distribution binary coded patterns with two different methods, and analyzed those patterns by using LCSLM (liquid crystal spatial light modulator). The error diffusion algorithm and direct quantization method were used as the binarization methods. The parameters of overall average brightness, mean square error, and diffraction efficiency were used in the comparison of reconstruction characteristics. The LCSLM which we used in this experiment was a binary reflective ferroelectric liquid crystal spatial light modulator addressed electrically with 256×256 pixels, 87% fill factor and 15 μm pixel pitch.