

論文95-32A-2-13

효율적인 Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 이진 위상 컴퓨터형성 홀로그램의 합성

(Synthesis of Binary Phase Computer Generated Hologram by Using an Efficient Simulated Annealing Algorithm)

金 喆 洙^{*}, 金 東 浩^{**}, 金 正 雨^{*}, 裴 長 根^{***},
李 在 坤^{*}, 金 秀 重^{*}

(Cheol Su Kim, Dong Ho Kim, Jeong Woo Kim, Jang Keun Bae,
Jae Gon Lee, and Soo Joong Kim)

요 약

본 논문에서는 이진 위상 컴퓨터 형성 홀로그램의 합성을 위한 효율적인 SA알고리즘을 제안한다. SA알고리즘은 반복적인 기법을 통해 최적의 해를 찾는 방법으로서, 알고리즘내에 있는 비용함수와 매개변수들의 선택이 중요하다. 이진 홀로그램 합성을 위한 기존의 SA알고리즘의 적용에서는 부적절한 매개변수와 비용함수의 선택으로 인하여 많은 문제점들을 지니고 있었다. 그러므로 본 논문에서는 최적해를 얻기위한 새로운 비용함수와 적절한 매개변수의 계산법을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 기존의 방법보다 회절효율과 재생잡음면에서 개선됨을 보여준다. 또한 광학적 실험을 통하여 제안된 방법의 재생영상을 보여준다.

Abstract

In this paper, We propose an efficient SA(simulated annealing) algorithm for the synthesis of binary phase computer generated hologram. SA algorithm is a method to find the optimal solution through iterative technique. It is important that selecting cost function and parameters within this algorithm. The applications of conventional SA algorithm to synthesize binary hologram have many problems because of inappropriate parameters and cost function. So, We propose a new cost function and a calculation technique of proper parameters required to achieve the optimal solution. Computer simulation results show that the proposed method is better than conventional method in terms of diffraction efficiency and reconstruction error. Also, We show the reconstructed images by the proposed method through optical experiment.

^{*} 正會員, 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook National University)

^{**} 正會員, 韓國移動通信(株)

(KMT)

^{***} 正會員, 龜尾專門大學 電子科
(Dept. of Electronics, Kumi Tech. Coll.)

接受日字 : 1994年 2月 12日

I. 서론

홀로그램은 물체파와 기준파의 간섭무늬를 매질에 직접 기록하는 광학적 홀로그램과 수학적으로 계산하여 부호화한 후 기록하는 컴퓨터 형성 홀로그램(computer generated hologram: CGH)으로 나뉜다. 광학적 홀로그램은 1948년 Gabor^[1]에 의해 처음으로 제안된 후 패턴인식등에도 이용되어 왔으며, 최근에는 광굴절 매질의 개발로 실시간 제작이 가능하게 되었다. CGH는 Lohmann등^[2]에 의해 최초로 연구되었으며, 광효율을 높이면서 정보를 충분히 전달할 수 있도록 개선이 되어 왔다.^[3]

간섭무늬의 연속정보를 CGH로 제작할 경우 기록소자의 해상도 제한, 정보의 저장, 그리고 전송에서 많은 문제점이 있으므로 이진화가 필요하다. 그러나 연속정보 이진화 할 때정보의 손실이 발생하고, 영상재생시 양자화 잡음으로 나타난다. 이를 해결하는 여러 방법들 중 최적의 해를 구할 수 있는 한 방법이 SA(simulated annealing) 알고리즘이다. 그러나 기존의 SA 알고리즘에서 반복과정 중 평가되는 비용함수(cost function)는 척도인자(scaling factor)를 도입하여 재생영상의 유사성만을 판별하였으며, 비용함수의 수렴에 많은 영향을 미치는 변수들을 경험을 통해 얻었다. 따라서 재생영상은 배경잡음과 낮은 회절효율(diffraction efficiency: DE)과 계산시간이 많아져서 최적화 알고리즘으로서 큰 효과를 얻지 못했다.^{[4] [5]}

본 연구에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 파시발의 정리(Parseval's theorem)를 이용하여 이상적인 목표값을 계산하였으며, 척도인자를 사용하지 않고 목표값에 수렴하도록 새로운 비용함수를 도입하였다. 즉 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미치는 초기온도와 냉각속도(cooling schedule)는 비용함수의 평균 변화량을 계산하여 결정하고, 전체 비용함수의 수렴과정을 제어하였다. 또한 투과함수는 이진위상으로 부호화하여 홀로그램의 투과율을 개선하였다. 제안한 방법으로 제작된 CGH의 재생영상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 방법과 비교할 때 양자화 잡음, 회절효율, 그리고 계산시간면에서 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한 광학적 실험을 통하여 제안된 방법의 재생영상을 확인하였다.

II. 이진 홀로그램 합성

이진 홀로그램의 제작은 컴퓨터를 이용하여 물체파를 해석하고 수학적 연산을 통해 크기와 위상을 이진으로 부호화하는 과정이다. 즉 홀로그램의 투과함수

$H(u,v)$ 를 부호화 하여 원하는 영상 $f(x,y)$ 을 재생할 수 있도록 한다. 이진 홀로그램의 제작은 푸리에 평면의 좌표를 (u,v) 로, $N \times N$ 배열내에 각각 R 과 C 의 크기를 가지는 이진 홀로그램으로 구성된다. 푸리에 평면에서의 투과함수 $H(u,v)$ 는

$$H(u,v) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \text{rect}\left(\frac{u-kR}{R}, \frac{v-lC}{C}\right) \quad (1)$$

와 같다. 여기서 u, v 는 공간 주파수이며, H_{kl} 은 이진화 홀로그램의 투과함수 값이다. 푸리에 영역과 재생영역의 관계는 단순한 2차원 푸리에 역변환이며, 이것은 Fresnel 회절이론의 근사화와 렌즈에 의한 2차위 상성분(quadratic phase component)을 제거하여

$$\begin{aligned} h(x,y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(u,v) \exp(j2\pi(ux+vy)) du dv \\ &= RC \text{sinc}(Rx, Cy) \times \\ &\quad \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp(j2\pi(kRx + lCy)) \end{aligned} \quad (2)$$

을 얻었다. 여기서 $h(x,y)$ 는 재생영역의 회절상을 나타낸다. 식 (2)를 각각 $RX = 1/N$ 과 $CY = 1/N$ 의 간격으로 표본화하고, R 과 C 를 1로 두어

$$\begin{aligned} h(mX, nY) &= \frac{1}{N^2} \text{sinc}\left(\frac{m}{N}, \frac{n}{N}\right) \times \\ &\quad \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)) \end{aligned} \quad (3)$$

을 얻었다. 식 (3)에서 N 은 X 와 Y 에 비해 상대적으로 매우 크기 때문에 sinc함수는 무시할 수 있다. 따라서 최종적으로 표본화된 재생영역에서는

$$\begin{aligned} h(mX, nY) &= \frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)) \\ &= \hat{h}_{mn} \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 근사화 된다. 식 (4)의 재생영상을 연속신호의 재생과 비교하면 투과함수 $H(u,v)$ 의 이진화에 따르는 오차를 가지므로 원영상의 많은 부분이 소실된 영상이 된다. 따라서 재생된 영상이 목표영상 $f(x,y)$ 의 대부분의 정보를 가지도록 홀로그램의 투과함수 H_{kl} 을 구성하고, 누출(leakage)에 의한 잡음을 최소화 하며 회절효율이 높은 이진화 홀로그램을 만들기 위해 SA 알고리즘을 도입한다.

III. SA 알고리즘에 의한 이진 홀로그램의 합성

SA 알고리즘은 최소에너지 상태에서 물질의 결정격

자를 만드는 통계열역학에서 유래한다. 물질을 용융점까지 가열시킨후 서서히 냉각시키면 각 분자들이 진동하고 인접한 분자들이 관련하여 가장 안정한 상태로 접근한다. 이와같이 반복적인 기법을 통해 최적의 해를 찾아가는 SA 알고리즘은 많은 분야에서 응용되고 있다. 이 알고리즘에는 사용되는 변수들이 많고, 이 변수들의 선택이 최적해를 얻는데 중요한 역할을 한다. SA 알고리즘의 특징은 비용함수의 일시적 증가를 조건부 수용하므로써 반복과정중의 국소 최적해(local minimum)에서 벗어날 수 있다는 것이며, 이것이 일반적인 반복기법을 사용하는 알고리즘과의 큰 차이점이다. 알고리즘에 사용되는 여러변수들 중 초기 투과함수는 전체 자유도에서 임의의 형태로 구성되어도 수렴에 영향을 주지 않고, 온도의 냉각속도(cooling schedule) Dt는 0.9 이상의 값에서는 국소 최적해에 빠지지 않는다고 알려져 있다^[6]. 그러나 초기온도와 목표값은 매우 중요한 변수이며, 지금까지는 경험적인 방법으로 선택되었다. 따라서 본 연구에서는 예상되는 가장 이상적인 목표값을 계산하고, 비용함수 감소의 평균변화량을 계산하여 반복의 전 과정에서의 확률의 분포를 예상하므로써 초기온도와 반복횟수를 선택하였다. 실제 수행 후 비용함수의 수렴의 분포로서 예상된 결과를 검증할 수 있었다. 이진 위상 홀로그래ムの 합성을 위한 효율적인 SA알고리즘의 순서도는 그림 1과 같다.

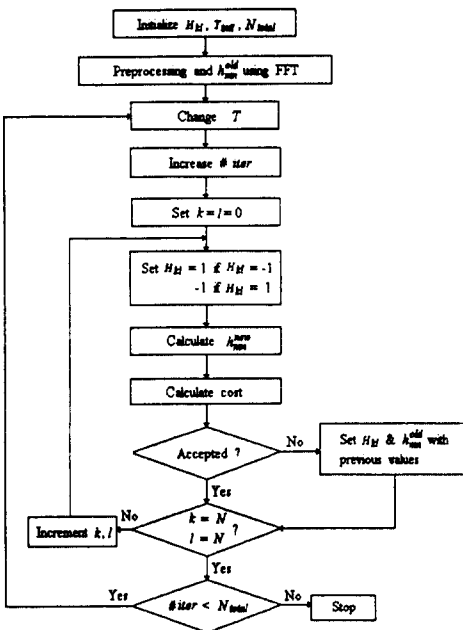


그림 1. SA 알고리즘의 순서도
Fig. 1. Flowchart of SA algorithm.

- SA 알고리즘의 적용과정은 다음과 같이 요약된다.
- ① 초기 홀로그래ムの 투과함수 Hkl을 무작위로 선정하고 비용함수 eold를 계산한다.
 - ② 초기 비용함수의 평균 변화량을 계산하고, 이로 부터 초기 온도와 반복 횟수를 결정하고 전체 비용함수의 수렴 과정을 예측한다.
 - ③ 홀로그래ム 투과함수의 한 화소를 바꾸어서 비용함수 값 enew를 계산하고, 이전의 비용함 수값 eold와의 차를 구한다.
 - ④ 비용함수의 변화량 Δe가 0 이하이면 수용하고, 0 보다 크면 조건부 수용을 한다.
 - ⑤ 인접한 투과함수의 화소를 바꾸고 위의 과정을 반복한다.
 - ⑥ ③-⑤ 과정을 원하는 횟수만큼 수행한다.

$$\Delta e = e^{*w} - e^{old} \quad (5)$$

과정 ④에서 비용함수 변화량이 0 이상일 때에도 조건부 수용을 도입하여 국소 최적해에 빠지지 않도록 했다. 수용여부의 결정은 볼츠만(Boltzman)분포를 갖는 확률이며, 이는

$$p(\Delta e) = \exp(-\Delta e / T_n), \quad T_n = (D_0^* T_{ini}) \quad (6)$$

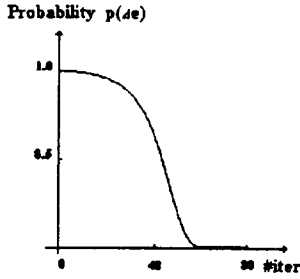
와 같다. 여기서 Tn는 n번째 반복횟수의 온도이고, Tini는 초기 온도이다. 식 (6)에서 확률 p(Δe)는 비용함수의 변화량과 온도의 함수이며, 반복과정 초기에는 확률을 거의 1에 가깝게 두어 비용함수의 증가를 대부분 수용하고, 말기에는 배제하도록 초기온도와 반복횟수를 결정하였다^[7]. 반복과정중 Δe의 변화가 적으면, 초기온도와 반복횟수로 확률 p(Δe)의 분포를 예측할 수 있다. 예측된 확률분포와 실제 비용함수의 전체수렴분포는 그림 2와 같다

그림 2의 결과로 부터 실제 비용함수의 확률분포가 예상된 결과와 일치함을 알 수 있고, 이때 예상 확률분포에 사용된 초기온도와 반복횟수가 실제 SA알고리즘의 변수로 결정되는 것이다. 투과함수 Hkl의 한 화소가 바뀔 때 마다 재생영역의 값의 변화는 푸리에 역변환의 방법 대신 신호창영역의 단순한 삼각함수값의 가감만으로

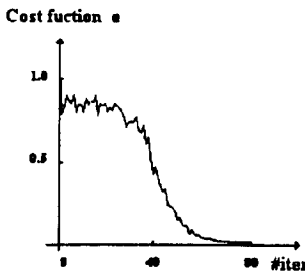
$$h_{mn}^{*w} = h_{mn}^{old} - t H_{kl} \exp(j2\pi(\frac{mk}{N} + \frac{nl}{N})) \quad (7)$$

와 같이 계산한다. 식 (7)의 t는 Hkl값의 변화에 따라 '2' 또는 '-2'가 되고, m, k, n, 그리고 l은 각각 0, 1, ..., N-1의 범위를 가지는 정수이며, mk+nl은 2(N2-2N+1)의 범위를 가지는 정수이다. 그리고 삼

각함수는 주기 N으로 반복되는 함수이며 미리 코사인 (cosine)과 사인(sine)을 계산하여 N개의 배열을 만들어 반복과정중에 다시 계산하지 않고 그대로 사용한다¹⁸⁾. 따라서 전체영역의 푸리에 역변환방법보다 계산시간을 많이 줄일 수 있다. 비용함수를 계산하는 기존의 방법과 제안된 방법은 아래와 같다.



(a)



(b)

그림 2. 비용함수의 확률 분포 비교
(a) 예상된 비용함수의 확률분포
(b) 실제 비용함수의 확률분포

Fig. 2. The comparison of probability distribution of cost function which is predicted.

- (a) Probability distribution of cost function that is predicted.
- (b) Probability distribution of practical cost function.

1. 기존의 비용함수

기존의 방법에서 최적화 알고리즘의 수렴적으로 사용되는 비용함수는 목표영상과 재생영상의 복소크기나 크기에 대한 평균자승오차(MSE)이다. 목표영상 f_{mn} 은 원영상의 스펙트럼의 최대 크기를 '1'로 정규화한 후 역변환하여 얻으며, 투과함수는 초기에 무작위로 선정된다. 반복과정 중에 비용함수는 한개의 화소가 바뀔때마다 평균자승오차를 계산하여 수렴 여부를 결정한다. 이 과정에서 목표영상의 크기와 재생영상의 신호창영역의 크기차이에 무관하게 유사성만을 판별한다. 크기

를 기준으로 하는 비용함수의 일반적인 식은

$$e = \frac{1}{AB} \sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |f_{mn} - \lambda h_{mn}|^2 \quad (8)$$

과 같으며, m_0 와 n_0 는 신호창영역(AxB)이 시작되는 상대적 좌표의 원점이다. 식 (8)의 척도인자 λ 는 f_{mn} 과 h_{mn} 의 상대적 크기를 일치시켜 주어 크기에 무관하게 그 모양의 유사성을 판별하기 위한 요소이다. 따라서 λ 는 평균자승오차를 λ 로 편미분하여 그 값을 0으로 두어 구한 실수값을 갖는 상수이다.

$$\frac{\partial e}{\partial \lambda} = 0 \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} f_{mn} h_{mn}^*}{\sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |h_{mn}|^2} \quad (10)$$

식 (8)과 같은 비용함수의 판별은 신호창 영역안에서 전체적인 모양은 원영상을 찾아가게 되지만, 실제적인 크기가 고려되지 않았다. 따라서 출력평면에서 에너지의 많은 부분들이 신호창 영역 외부에 작은 반점 (speckle)의 형태로 존재하며, 신호창 영역내의 값들 보다 크다. 이것은 회절효율이 낮은 원인이 되며, 재생 후 후처리 하여야만 관심영역을 관측할 수 있다. 효율을 높이고 잡음을 제거하기 위해서는 재생영역의 전 평면을 고려하여 비용함수를 평가해야 하므로 많은 계산시간이 필요하다. 또한 '1'과 '0'의 값을 가지는 크기 홀로그램이므로 투과율이 낮다.

2. 제안된 비용함수의 평가

기존의 방법에서 재생시 발생하는 작은 반점, 낮은 회절효율은 적절하지 못한 목표값 선정 때문이며, 이외에도 크기의 부호화에 따르는 투과율, 척도인자 계산에 소요되는 많은 시간등의 문제점들이 있다. 따라서 목표영상은 원영상의 모양을 가지고 있으며, 그 크기는 재생영역의 전체 에너지가 모두 신호창영역안에 모이도록 계산하여 배경잡음을 줄이고 회절효율을 극대화 한다. 이진 위상 홀로그램은 0과 π 의 위상만을 가지며 다음 식과 같이 표현된다.

$$H_k = \exp(\lambda) \text{ or } \exp(j\pi) \quad (11)$$

푸리에 영역의 전체 에너지와 재생영역의 전체에너지를 파시발의 정리를 이용하면

$$\frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} |H_{kl}|^2 = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |h_{mn}|^2 \quad (12)$$

와 같이 표현된다. 따라서 식 (11)의 이진 위상 홀로

그림은 투과함수의 형태에 무관하게 출력평면에서의 전체에너지값은 항상 '1'이다. 그러므로 목표영상의 전체에너지가 '1'이 되도록 각 화소의 크기를 전처리 과정에서 계산한다. 이와 같은 전처리 과정을 거쳐 이상적인 목표값을 설정하고, 반복기법을 통해 이 값에 접근하도록 한다. 기존의 '1'과 '0'에 의한 크기 이진화는 Hkl중에서 '1'의 갯수를 알 수가 없으므로 재생된 영역의 에너지를 계산할 수 없다. 홀로그램은 재생영상의 세기에 관심이 있으며, 오차의 평가방법 또한 재생영상의 세기에 관심을 둔다. 본 연구에서 제안된 평균자승오차의 비용함수는

$$e = \frac{1}{AB} \sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |f_{mn}|^2 - |h_{mn}|^2|^2 \quad (13)$$

$$c \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |f_{mn}|^2 = e_t \quad (14)$$

$$|f_{mn}|^2 = c |f_{mn}|^2 \quad (15)$$

와 같으며, 이는 척도인자를 사용하지 않고 목표영상의 크기와 실제크기를 동시에 찾아갈 수 있다. 식 (14)의 e_t 는 목표효율을 나타내고 이는 1보다 작은 값이며 이상적인 경우 1의 값을 가진다. 본 연구에서는 목표효율이 1인 경우와 0.85인 경우에 대해 수행하였다. 식 (14)에서 c 는 목표영상 f_{mn} 의 전체 에너지가 e_t 가 되도록 하는 상수이며, 영상에 따라 전처리 과정에서 결정된다. 제안된 비용함수는 목표영상과 재생영상의 유사성을 판정하는 것이 아니라, 계산된 이상적인 값을 찾아가는 것이다. 원영상의 크기가 $A \times B$ 이면, 재생영역에서는 대칭특성에 의해 각각 $e_t/2$ 만큼의 에너지를 가지는 두개의 영역을 가지며, e_t 가 1인 경우 출력 평면 전체의 에너지가 이상적으로는 두개의 영역에 모두 모여야 한다. 그리고 이것은 본질적으로 신호창영역 외부를 제한하고 기존의 방법에서 생기는 배경잡음을 제한할 수 있으며, 동시에 높은 효율을 가질 수 있다. 또한 기존의 방법에서 신호창영역을 영상의 크기보다 큰 외곽을 잡아 계산한 것과 달리 제안된 알고리즘은 영상이 있는 위치에서만 비용함수를 평가하고, 척도인자를 사용하지 않으므로 계산시간을 많이 줄일 수 있다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 두 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 첫번째는 기존의 방법과의 객관적 비교를 위해 32x32크기의 홀로그램으로 3x3의 점배열(spot array)을 만들어, 균일성(uniformity: U), 회절효율(DE), 그리고 이진화 효율(binary efficiency: BE)

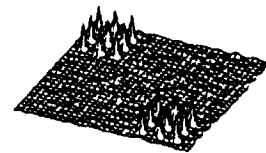
을 구하였다. 평가수식은 각각

$$DE = \frac{\sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |h_{mn}|^2}{\sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |h_{mn}|^2} \times 100 \% \quad (16)$$

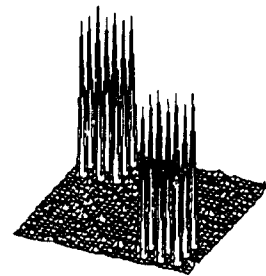
$$BE = \frac{\sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |h_{mn}|^2}{\sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |f_{mn}|^2} \times 100 \% \quad (17)$$

$$U = \frac{P_{max} - P_{min}}{2P_{ave}} \times 100 \% \quad (18)$$

와 같다.



(a)



(b)

그림 3. 이진 홀로그램에 의한 3x3 점배열의 재생

(a) 기존의 방법 (b) 제안된 방법 2

Fig. 3. Reconstruction of 3x3 spot arrays by binary hologram.

(a) Conventional method, (b) Proposed method 2.

표 1. 점배열 생성에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과의 비교

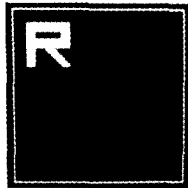
Table 1. The comparison of computer simulation results for generating spot arrays.

	U	DE	BE
conventional method	1.50	24.5	
proposed method 1 ($e_t=1.0$)	2.95	77.2	77.2
proposed method 1 ($e_t=0.85$)	1.22	76.9	90.5

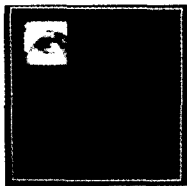
식 (16)의 회절효율은 신호창 내부의 에너지와 전체

에너지의 비를 나타내어 점배열에 나타나는 배경잡음의 정도를 예측할 수 있도록 한다.

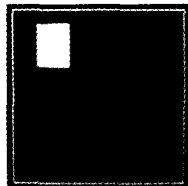
식 (17)은 알고리즘이 목표값에 수렴하는 정도를 나타내며, 식 (18)은 점배열의 균일성을 평가한다. 여기서 P_{max} , P_{min} , 그리고 P_{ave} 는 점 배열의 최대 크기, 최소 크기, 그리고 평균 크기를 나타낸다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 표 1과 그림 2에 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 목표 영상

(a)이진 문자 영상, (b)Lena 부분 영상
(c)명암도 시험 영상

Fig. 4. Target images.

(a)binary character image,
(b)partial image of Lena,
(c)gray test image.

표 2. 시험영상 재생에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과의 비교

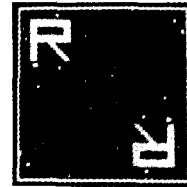
Table 2. The comparison of computer simulation results for reconstructing test images.

	DE	BE
conventional method	32	
proposed method 1 ($e_r = 1.0$)	78.0	78.0
proposed method 1 ($e_r = 0.85$)	74.7	89.2

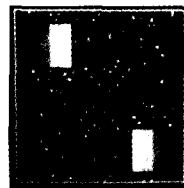
표 1에서는 배열의 균일성, 회절효율면에서 제안된 방법이 기존의 방법보다 더 우수함을 알 수 있다. 이진화 효율에 대해서 제안된 방법은 목표효율을 낮게 잡으면 100%에 접근하나, 기존의 방법은 상한값이 없어, 이의 비교는 무의미하다고 볼 수 있다.

그림 3(a)는 기존의 방법에 의한 점배열 영상으로서

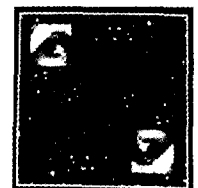
DC값을 제거한 것이다. 점배열의 크기가 목표 영상에 비해 훨씬 작은것은 대부분의 에너지가 DC값에 포함되어 있기 때문이다. 그림 3(b)는 제안된 방법 2에 의한 결과이며, 목표값에 거의 수렴함을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 기존의 방법에 의한 재생영상

(a)이진 문자 영상, (b)Lena 부분 영상
(c)명암도 시험 영상

Fig. 5. Reconstruction images by conventional method.

(a)binary character image,
(b)partial image of Lena,
(c)gray test image.

두 번째 시뮬레이션은 64x64의 크기안에 16x16의 크기의 신호창을 가지는 이진문자영상, 명암도 시험 영상, 그리고 Lena 영상의 눈 부분을 사용하였으며, 이진화 효율과 회절효율로서 비교하였다. 표 2의 결과는 5회에 걸쳐 초기 투과함수를 랜덤하게 선택하여 시뮬레이션 한 결과의 평균치이다. 매 회마다 회절효율과 이진화 효율이 큰 변동이 없는 것으로 보아 초기 투과함수의 선정은 SA알고리즘에서 중요한 변수가 되지 않음을 확인하였다. 목표효율의 설정과 목표값에 수렴하는 정도는 반대급부 관계가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 제안된 방법 2의 목표효율을 0.85로 임의 선택하였으나 이것을 수식적인 연산을 통해 계산할 수 있는 방법에 대해서는 앞으로 연구가 필요하다^[9]. 시뮬레이션 결과는 컴퓨터 화면 영상을 촬영한 것이다. 목표 영상은 그림 4은 목표영상을 나타낸다. 그림 5는 기존의 방법에 의해 재생된 영상으로 DC성분을 제거한 후 관측한 것이다. 재생영상에 많은 배경잡음을 가지고 있어 회절효율이 낮음을 알 수 있다. 그림 6과 7은 제안된 방법 1, 2로 재생한 영상을 나타낸다.

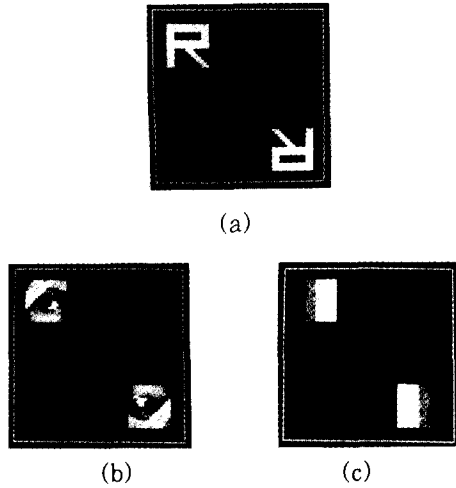


그림 6. 제안된 방법1에 의한 재생영상
 (a)이진 문자 영상, (b)Lena 부분 영상
 (c)명암도 시험 영상
 Fig. 6. Reconstruction images by proposed method 1.
 (a)binary character image,
 (b)partial image of Lena,
 (c) gray test image.

재생영상에는 DC성분이 존재하지 않으며, 에너지의 대부분이 신호창내에 모여 있어 회절효율이 높음을 알 수 있다.

V. 광학적 실험 및 고찰

이진 위상 홀로그램의 제작을 위해서 먼저 컴퓨터 형성 홀로그램의 패턴을 플로터(plotter)로 그린후 축소하여 마스크를 제작한다. 이 마스크를 이용하여 화학적 식각을 통하여 유리판의 두께를 제어하였다. 식각의 두께는 다음식으로 구할 수 있다.

$$D = \frac{\lambda\phi}{2\pi(n-1)} \tag{19}$$

여기서 D는 식각하고자 하는 유리판의 두께이고, λ는 사용 레이저(He-Ne)의 파장이며, n은 유리판의 굴절률이다. 그리고 φ는 제어하고자 하는 위상을 나타낸다. 유리판의 식각 두께는 여러번 실험을 거쳐서 BHF-(buffered hydrofluoric acid)용액에 1분 42초 담그두어 제어했다. 광학적 실험을 위한 실험구성도는 그림 8과 같으며, 제안된 방법 1에 의한 광학적 실험결과를 그림 9에 나타내었다. 실험결과 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 이론적으로는 나타나지 않아야 될 DC성분이 실험결과에는 조금 나타났는데 이는 홀로그램제작시 화학적 식각을 이용함으로써 정확한 위상의 제어가 어려웠고, 에지부분의 손

실등에 의한 결과로 본다.

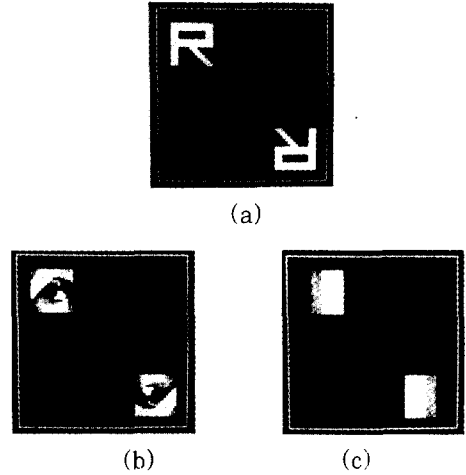


그림 7. 제안된 방법 2에 의한 재생영상
 (a)이진 문자 영상, (b)Lena 부분 영상
 (c)명암도 시험 영상
 Fig. 7. Reconstruction images by proposed method 2.
 (a)binary character image,
 (b)partial image of Lena,
 (c)gray test image.

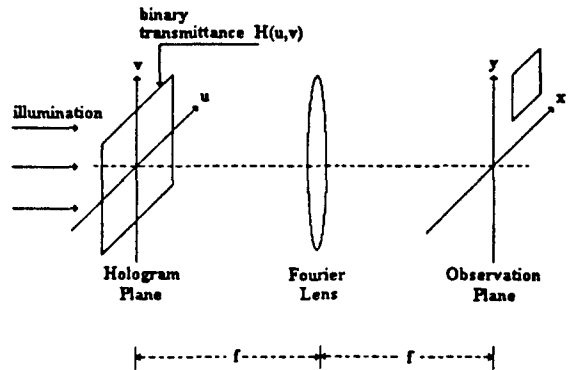
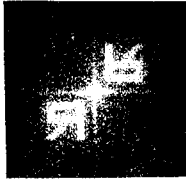


그림 8. 광학적 실험 구성도
 Fig. 8. Schematic configuration of optical experiment.

VI. 결 론

연속적인 정보를 이진화하는 반복적인 알고리즘들 중 최적의 해를 찾는 효율적인 SA 알고리즘을 이진 위상 홀로그램의 제작에 이용하였다. 홀로그램의 투과함수를 최적화하기 위해 본 연구에서는 SA 알고리즘에서 중요한 역할을 하는 비용함수를 새로이 정의하였고, 초기온도와 목표값을 선정하는 이상적인 방법을 제안하였다. 새로 정의된 비용함수는 반복과정중에 목표영상

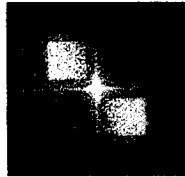
의 크기와 모양을 동시에 평가할 수 있으며, 초기온도와 목표값선정은 비용함수의 평균변화량을 통하여 결정하였다. 그리고 전체 비용함수의 수렴계적을 예측하였고, 시뮬레이션 결과 예측된 결과를 따라감을 확인하였다. 제안된 방법으로 홀로그램을 제작한 경우, 기존의 방법보다 회절효율, 잡음의 영향, 그리고 계산시간 면에서 개선됨을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 광학적 실험을 통하여 제안된 방법의 재생 영상을 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 9. 제안된 방법1에 의한 광학적 재생영상
(a)이진 문자 영상, (b)Lena 부분 영상
(c)명암도 시험 영상

Fig. 9. Optical reconstruction images by proposed method 1.
(a)binary character image,
(b)partial image of Lena,
(c)gray test image.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Goodman "Introduction to Fourier Optics." McGraw-Hill Company.
[2] A. W. Lohmann and D. P. Paris "Binary

Fraunhofer Holograms, Generated by Computer," *Appl. Opt.*, vol. 6, no. 10, pp. 1739-1748, 1967.

- [3] G. Tricoles, "Computer generated Holograms : an historical review," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 20, pp. 4351-4360, 1987.
[4] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 14, pp. 2788-2798, 1987.
[5] B. K. Jennison, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Iterative approaches to computer-generated holography," *Opt. Eng.*, vol. 28, no. 6, pp. 629-637, 1989.
[6] M. S. Kim, C. C. Guest, "Simulated annealing algorithm for binary phase only filters in pattern classification," *Appl. Opt.*, vol. 29, pp. 1203-1208, 1990.
[7] M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, "Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm," *Opt. Lett.* vol. 14, no. 11, pp. 545-547 1989.
[8] B. K. Jennison, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Efficient design of direct-binary-search computer generated holograms," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 8, no. 4, pp. 652-660, 1991.
[9] A. G. Kirk, T. J. Hall, "Design of binary computer generated holograms by simulated annealing : coding density and reconstruction error," *Opt. Comm.*, vol. 94, no. 6, pp. 491-496, 1992.

— 저 자 소 개 —

金 喆 洙(正會員) 第 30卷 第 4號 參照

1994년 4월 ~ 현재 경북대학교
전자공학과 조교

金 東 浩(正會員)

1966년 11월 10일생. 1992년 경북대학교 전자공학과
졸업 (공학사). 1993년 경북대학교 대학원 전자공학과
졸업 (공학석사). 1993년 4월 ~ 1995년 1월 삼성전
자 데이터통신부 근무. 1995년 1월
~ 현재 한국 이동통신 (주) 근무

金 正 雨(正會員) 第 31卷 第 6號 參照

1989년 ~ 1993년 8월 경북대학
교 대학원 전자공학과 박사과정 수
료.

竊 長 根(正會員) 第 31卷 第 6號 參照

1994년 3월 ~ 현재 구미전문대학
전자과 전임강사.



李 在 坤(正會員)

1966년 9월 5일생. 1989년 경
북대학교 전자공학과 졸업 (공학
사). 1993년 경북대학교 대학원
전자공학과 졸업 (공학석사).
1993년 ~ 현재 경북대학교 대
학원 전자공학과 박사과정 재학

金 秀 重(正會員) 第 31卷 第 8號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 정교수

중