

## TS 알고리듬과 SA 알고리듬을 이용한 컴퓨터 형성 홀로그램의 성능 향상

조창섭 · 신창목<sup>†</sup> · 조규보 · 김수중

경북대학교 전자전기컴퓨터학부

④ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

김철수

경주대학교 컴퓨터멀티미디어학부

④ 780-712 경북 경주시 효현동 산42-1번지

(2004년 6월 29일 받음, 2005년 1월 6일 수정본 받음)

본 논문에서는 Tabu Search(TS) 알고리듬과 Simulated Annealing(SA) 알고리듬을 결합하여 향상된 성능을 갖는 컴퓨터 형성 홀로그램을 설계할 수 있는 방법을 제안하였다. 회절 효율의 향상을 위해 TS 알고리듬으로 이상적인 패턴을 생성하고, 이를 SA 알고리듬에서 무작위로 구성된 초기 패턴과 대체하여 컴퓨터 형성 홀로그램을 설계하였다. 컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 통하여 제안한 방법과 SA 알고리듬과의 성능을 비교한 결과 제안한 방법으로 재생한 영상이 SA 알고리듬을 이용하였을 때보다 향상된 회절 효율과 균일도를 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

주제어 : SA(Simulated Annealing), TS(Tabu Search), CGH(Computer-Generated Hologram).

### I. 서 론

광학적 홀로그램(optical holograms)은 1948년 Gabor가 제안한 방법으로 물체가 가지는 크기 및 위상 정보를 레이저를 이용하여 기준파와의 간섭을 통해 기록한다. 이는 완벽하게 입체 영상을 표현할 수 있어 많은 분야에서 적용되고 있으나, 정밀한 광학 소자가 필요하며, 고출력의 레이저가 필요할 뿐만 아니라 화학적 처리 과정에서 발생할 수 있고 많은 문제점들을 가지고 있다.<sup>[1]</sup> 이에 반하여, 1966년 Brown 등이 제안한 컴퓨터형성홀로그램(Computer-Generated Hologram; CGH)은 컴퓨터를 이용하여 물체가 가지는 진폭 및 위상 정보를 회절 이론(diffractio-theory)과 푸리에 변환(Fourier transform) 등의 수학적인 연산을 이용해 간섭파면이 가지는 정보를 해석하여 구현하는 방법으로 광학적 홀로그램이 가지는 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 가상의 물체에 대한 홀로그램도 제작이 가능하다. 이러한 CGH의 제작초기에는 진폭 정보와 위상 정보를 함께 이용하여 제작하였으나, 광 효율과 정보의 정확한 표현을 위해 위상형 홀로그램에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>[2]</sup>

연속적인 위상 정보를 가지는 CGH 제작에는 기록소자의 제한과 수학적 연산량등의 문제점이 있으므로, 수학적 계산을 용이하게 하고, 정보의 기록 및 제어를 쉽게하기 위해 정보의 이진화가 필요하다. 그러나 이진화 과정에서 양자화를 할 경우 양자화 오차가 발생하고 이로 인해 재생된 영상에서 잡음이 나타나게 된다. 이러한 양자화 오차를 최소화하여 재

생 영상을 좋게 하기 위한 방법으로 오차 확산(error-diffusion)과 같은 비반복적인 방법과 반복 푸리에 변환 알고리듬(Iterative Fourier Transform Algorithm ; IFTA) 등의 반복적인 방법이 있다.<sup>[3-7]</sup> 이러한 최적화 알고리듬들 중에서 반복적인 방법의 SA 알고리듬은 전역탐색의 확률이 높으며, 높은 회절 효율을 가진다. 그러나 SA 알고리듬의 초기 패턴이 무작위 구성된 값을 이용하기 때문에 SA 알고리듬만을 이용하여 CGH를 설계하기 보다는 다른 최적화 알고리듬과 결합하여 회절 효율을 향상시킨 알고리듬이 최근에 연구되고 있다.<sup>[8-9]</sup>

본 논문에서는 터부 검색(Tabu Search ; TS) 알고리듬과 SA 알고리듬을 이용하여 SA 알고리듬만을 이용하였을 때보다 향상된 효율을 가지는 이진 위상 컴퓨터 형성 홀로그램을 설계하는 방법을 제안하였다. TS 알고리듬은 터부조건(Tabu condition)을 가진 값은 피하면서 열망조건(Aspiration level condition)에 적합한 최적해를 찾는 방법으로 터부목록을 이용하여 탐색시간을 줄일 수 있다는 장점을 가진다.<sup>[10-11]</sup> 이러한 특징을 이용하여 먼저 TS 알고리듬을 이용하여 이상적인 홀로그램 패턴에 접근할 수 있는 대략적인 패턴을 생성하고 이것을 SA 알고리듬의 입력 패턴으로 이용하여 회절 효율을 향상시킨 CGH 설계방법을 제안하였다.

### II. 본 론

#### 2.1. 이진 위상 컴퓨터 형성 홀로그램

연속 위상 홀로그램은 연속적인 위상 정보의 제어 및 정확한 기록이 어렵기 때문에 양자화 과정을 이용해 연속 위상 홀로그램의 특성을 유지할 뿐만 아니라 정보의 기록 및 제어

<sup>†</sup>E-mail: lensless@ee.knu.ac.kr

가 용이한 이진 위상 흘로그램이 연구되어 지고 있다.<sup>[2-4]</sup> 연속 정보를 가지는 공간 영역의 회절 무늬  $h(x, y)$ 와 주파수 영역에서의 흘로그램  $H(u, v)$ 는

$$h(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} H(u, v) \exp\{-j2\pi(ux + vy)\} dudv \quad (1)$$

와 같이 푸리에 변환으로 나타낼 수 있으며, 이진 위상 컴퓨터 형성 흘로그램(binary phase CGH ; BPCGH)는

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

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서  $R$ 과  $C$ 는 흘로그램 평면의 화소 크기를 나타내며, 재생 영상은 식 (2)를 역 푸리에 변환으로

$$\begin{aligned} x, y &= \int \int_{-\infty}^{\infty} H(u, v) \exp(j2\pi(ux + vy)) dudv \\ &= RC \operatorname{sinc}(Rx, Cy) \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp(j2\pi(kRx + lCy)) \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서  $Rx, Cy$ 는 재생평면의  $x, y$  좌표에 대응되는 흘로그램 평면의 값을 나타낸다.  $Rx$ 과  $Cy$ 를 각각  $1/N$ 의 간격으로 표본화하고,  $R$ 과  $C$ 의 값을 1로 두면,

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

와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서  $mX, nY$ 는 재생 평면의  $x, y$  축에 대해 각각  $m$ 번째,  $n$ 번째 화소를 나타낸다. 식 (4)에서  $X$ 나  $Y$ 에 비해  $N$ 값이 상대적으로 크므로,  $\operatorname{sinc}$ 함수는 무시된다. 결국 재생 영상은

$$\begin{aligned} h(mX, nY) &= \frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp\left(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right) \\ &= h_{mn} \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 표현된다.

식 (5)를 이용하여 재생된 영상은 양자화에 의한 잡음이 나타나므로, 식 (5)와 원 영상과의 차이를 최소화 할 수 있는 최적화된 이진 투과 함수  $H_{kl}$ 이 필요하다.

## 2.2. SA 알고리듬

SA 알고리듬은 통계열역학에서 사용된 알고리듬으로, 온도감소에 최소 에너지가 되는 것을 반복적으로 탐색하는 알고리듬으로 방문 판매원 문제(traveling salesmen problem)등의 조합 최적화 문제를 해결하는데 사용된다.

SA 알고리듬을 이용하여 이진 위상 컴퓨터 형성 흘로그램

(binary phase computer generated holograms; BPCGHs)을 설계하기 위해서는 냉각 속도(cooling schedule), 초기 온도(initial temperature), 목표 효율(target efficiency)등의 매개 변수를 통해 온도 감소에 따른 목표 영상과 재생 영상의 에너지 차이가 최소가 되는 점을 반복 과정을 통해 설계할 수 있다. 이 과정에서 매개변수들의 값을 어떻게 선택하느냐에 따라서 성능이 결정되므로 적절한 변수의 선택이 필수적이다.

SA 알고리듬은 초기 반복 과정에서 냉각 속도에 의해 발생될 수 있는 비용함수(cost function)의 일시적 증가로 인한 국부 최적해(local minimum)를 식 (6)과 같은 볼츠만 확률 분포식(Boltzman probability distribution)을 이용하여 탐색 초기에 반복과정에서의 온도가 비용함수의 평균변화량에 비해 상대적으로 큰 값을 가지도록 하여, 확률값이 1에 가깝도록 하여 국부 최적해를 빠져나오도록 설계하였다.

$$T_n = (D_t)^n T_{ini}, P(\Delta e) = \exp\left(-\frac{\Delta e}{T_n}\right) \quad (6)$$

여기에서,  $T_{ini}$ 는 초기온도,  $T_n$ 은  $n$ 번째 반복과정에서의 온도,  $D_t$ 는 냉각속도,  $\Delta e$ 는 비용함수의 평균변화량을 나타낸다.

본 논문에서 사용한 SA 알고리듬의 흐름도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 사용된 비용함수는 목적 영상과 재생 영상과의 회절 효율이 최소가 되도록 하기 위해 제한된 신호 창 영역 내에서 목표 영상과 재생 영상사이의 평균 자승 오차(mean square error ; MSE)로

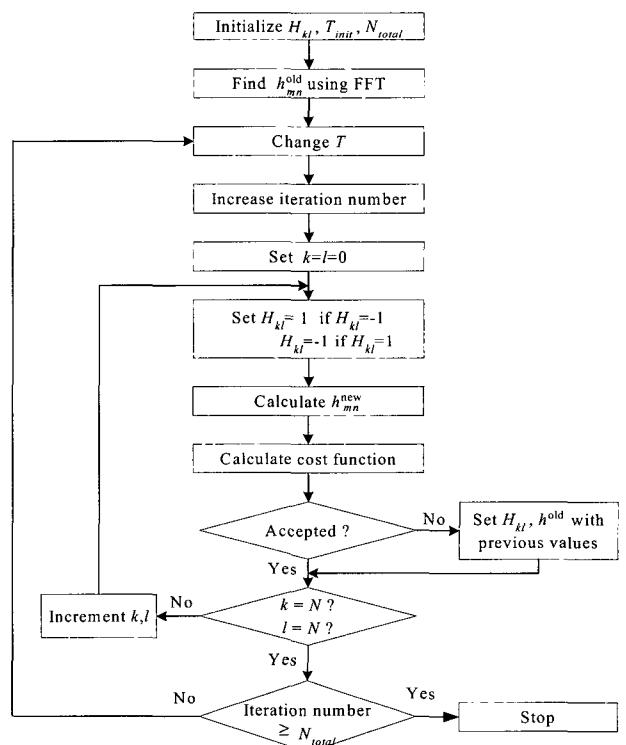


그림 1. SA 알고리듬의 흐름도

$$MSE = \frac{1}{AB} \sum_{m=1}^{m=A-1} \sum_{n=n_0}^{n=B-1} ||t_{mn}|^2 - |h_{mn}|^2|^2 \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 A와 B는 목표 영상의 가로, 세로의 크기이며,  $t_{mn}$ 과  $h_{mn}$ 은 각각 목표 영상과 재생 영상을 나타낸다.

### 3.3. TS 알고리듬

TS 알고리듬은 1980년대 F. Glover가 제안한 알고리듬으로, 비선형 수렴 문제를 해결하기 위한 유전 알고리듬이나 SA 알고리듬과 같은 휴리스틱 조합 최적화 알고리듬으로 탐색 공간이 큰 방문 판매원 문제등의 경로 최적화에 효과적으로 사용될 수 있다.<sup>[10]</sup> SA 알고리듬은 확률을 이용하여 국소 최적해를 피할 수 있으나 일반적으로 계산시간이 많이 걸리고, 최적해에 도달하기 위해서는 무한대의 시간을 소비할 수도 있다. 이에 비해 TS 알고리듬은 최적해를 찾는 과정에서 메모리를 이용하여 각 단계별로 최적의 값을 가지는 경우를 탐색하여 선택하며, 이 때 선택된 값을 최적화 함수 안에서 기준으로 사용한다. 최적화 과정에서 사용되는 메모리는 과거로부터 얻은 값을 저장함으로써 재탐색을 하지 않으므로 탐색의 효율을 높일 수 있다. 이러한 TS 알고리듬은 Hill climbing을 기반으로 만들어진 알고리듬으로 Hill climbing 탐색기법에 비해 국소 최적해에 빠질 위험이 적으면서 전역 탐색이 가능하다. 다음은 조합 최적화문제에 대한 Hill climbing을 나타낸 것이다.

1. 초기값  $x \in X$ 를 선택한다.
2.  $c(s(x)) < c(x)$ 를 만족하는 어떤  $s \in S(x)$ 를 선택하여, 만약 그러한  $s$ 가 존재하지 않으면,  $x$ 가 최적해가 되어 탐색과정을 종료하고, 그렇지 않으면 다음 단계로 이동한다.
3.  $x := s(x)$ 라 두고, 2단계로 이동한다.

여기에서  $x$ 는 최적값을 가질 수 있는 해를 나타내며,  $X$ 는 해집합을 의미한다. 이 방법은 더 이상 개선점이 없을 때 해를 얻을 수 있으나 전역 최적해라는 보장이 없다. 다음은 TS 알고리듬을 나타낸 것으로 최적해를 탐색하기 위해서 터부 조건(tabu condition)과 열망 조건(aspiration condition)을 이용하여 탐색 과정에서 우선적으로 터부 조건을 피하는 탐색

을 하게 되는데 이러한 조건이 오히려 좋은 해가 존재하는 곳으로 이동하는 것을 방해할 수 있다. 그렇기 때문에 필요할 때에는 열망 조건을 사용하여 터부 조건을 무시할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 최적해를 탐색하기 위해서 SA 알고리듬에서 사용한 식 (7)의 MSE를 터부 조건으로 이용하고, 열망 조건은 무시하였다.

1. 초기값  $x \in X$ 를 선택하고,  $x^* := x$ 라 두고, 반복 횟수  $k=0$ , T를 빈 상태로 시작한다.
2. 만약  $S(x) - T$ 가 없으면 4단계로 이동하고, 그렇지 않으면  $k := k+1$ 로 두고,  
 $s_k(x) = \text{OPTIMUM } (s(x) \mid s \in S(x) - t)$   
 $S(x) \in S(x) - T$ 를 선택한다.
3.  $x := s_k(x)$ 라 두고, 만약  $c(x) < c(x^*)$ 이면,  
 $x^* := x$ 라둔다.  
여기에서,  $x^*$  : 가장 좋은 해를 나타낸다.
4. 반복 횟수가 초과되거나,  $S(x) - T = \emptyset$ 이면 탐색 과정을 종료하고 그렇지 않으면  $T$ 를 수정하여 2단계로 이동한다.

### 4.4. 제안한 알고리듬

본 논문에서 제안한 BPCGH의 설계 방법은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

TS 알고리듬과 SA 알고리듬은 무작위로 구성된 패턴을 이용하여 재생된 영상과 목표 영상과의 차이를 반복적인 수행으로 줄여나가는 알고리듬으로, SA 알고리듬은 전역적이고 면밀한 탐색이 가능하지만, 일정 횟수이상을 반복할 경우에는 회절 효율이 더 이상 증가되지 않는다.<sup>[10]</sup> 이럴 경우에 SA 알고리듬을 독립적으로 사용하지 않고 다른 알고리듬과 결합하여 훌로그램을 만들면 회절 효율이 향상된다.<sup>[11]</sup> TS 알고리듬은 열망 조건이나 터부 목록을 사용하지 않고 터부 조건만을 이용한 최적해의 탐색이 가능하여 이상적인 훌로그램 패턴에 근접한 결과값을 얻을 수 있어 SA 알고리듬의 초기 패턴을 생성하는데 적합하다. TS 알고리듬을 이용하여 SA 알고리듬의 초기 패턴을 생성하기 위해서는 그림 3의 (b)와 같이 1과 -1로 구성된 무작위 패턴을 만들어 MSE를 계산하고, 그림 (a)와 같은 무작위로 구성된 작은 크기의 셀을 만들어 그림 (b)의 전영역에 대해서 그림 (a)를 대입하면서 MSE를 계산한 후, 대입하기 이전의 MSE와 비교하여 낮은 값을

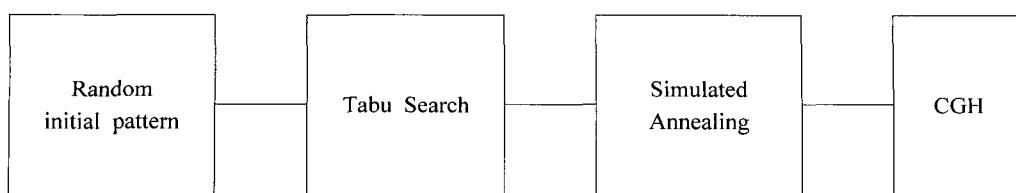


그림 2. 제안한 알고리듬의 구조

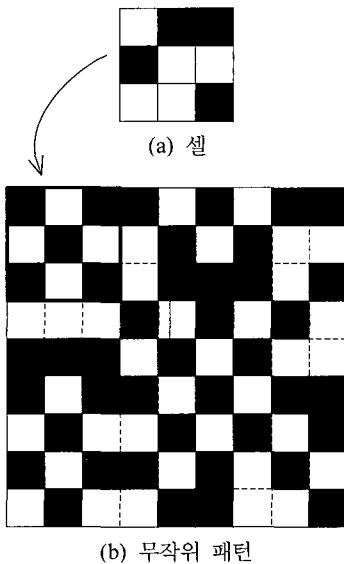


그림 3. TS 알고리듬의 적용.

가질 경우에는 다음 부분에 대해 적용하고, 그렇지 않을 경우에는 더 작은 값의 MSE를 가진 패턴이 나올 때까지 새로운 작은 크기의 무작위 패턴을 대입한다. 이러한 과정을 그림 (b)의 전 영역에 대해 수행하는 것을 한번의 반복과정으로 두어 정지 조건으로 주어진 횟수만큼 반복 수행하였다. 이렇게 만들어진 결과 패턴을 SA 알고리듬의 입력 패턴으로 사용하여 전역적이면서, 면밀한 탐색 과정을 한번 더 수행하였다.

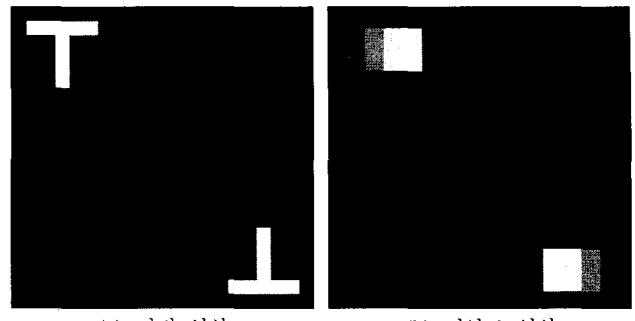
### III. 컴퓨터 모의 실험 및 광 실험

본 논문에서 제안한 알고리듬의 성능을 평가하기 위해서 컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 하였다. 컴퓨터 모의 실험에서는 제안한 알고리듬으로 설계된 BPCGH가 가지는 성능을 정량적으로 표현하기 위한 평가 방법으로 수식 (8), 수식 (9)과 같은 회절효율(diffractio efficiency ; DE)과 균일도(uniformity)를 이용하였다.

$$DE = \frac{\sum_{m=m_0}^{A+m_0} \sum_{n=n_0}^{B+n_0} |h_{mn}|^2}{\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{M-1} |h_{mn}|^2} \times 100\% \quad (8)$$

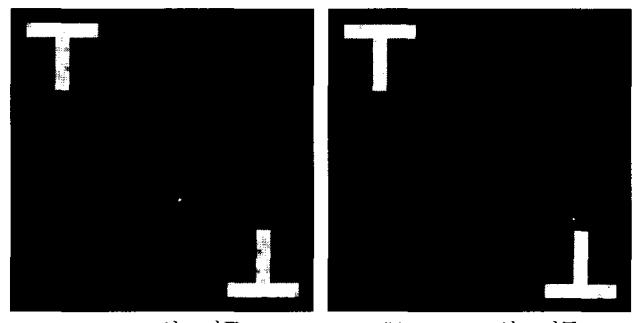
$$U = \frac{1}{MN} \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{ave}}} \quad (9)$$

여기에서  $N$ 과  $M$ 은 전체 영상의 크기를,  $A$ 와  $B$ 는 신호창이 가지는 크기를 나타낸다. 회절 효율은 전체 영상에 대한 신호창이 가지는 에너지의 정도를 나타내며, 균일도는 동일한 밝기를 가지는 화소들 사이의 차이가 얼마나 나는지에 대한 척도로써 이 두가지 함수를 사용하여 제안한 알고리듬이 SA 알고리듬에 비해서 신호창 내부의 잡음이 줄어드는지에 대해 평가할 수 있다.



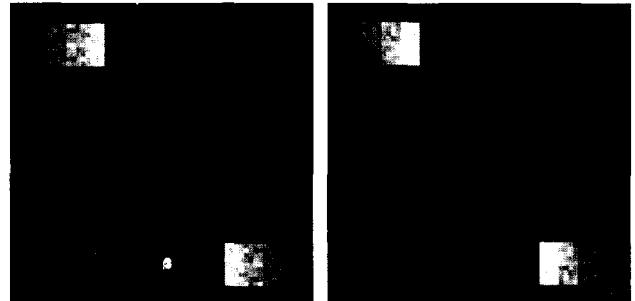
(a) 이진 영상 (b) 명암도 영상

그림 4. 목표 영상.



(a) SA 알고리듬 (b) TS+SA 알고리듬

그림 5. 재생된 이진 영상.



(a) SA 알고리듬 (b) TS+SA 알고리듬

그림 6. 재생된 명암도 영상.

모의 실험에서 사용된 목표 영상은 이진값을 가지는 'T' 영상과 명암도 패턴 영상으로 그림 4와 같다. 이 때 전체 영상은  $64 \times 64$ 의 화소로 구성된 크기를 가지며, 신호창의 크기는 이진 영상은  $16 \times 16$ , 명암도 영상은  $16 \times 10$ 의 크기를 가진다. 그림 5와 그림 6은 이진 영상과 명암도 영상에 대한 재생 영상으로, 그림 (a)는 SA 알고리듬을 그림 (b)는 제안한 알고리듬을 적용하여 나타난 재생 영상이다. 여기에서 제안한 알고리듬은 TS+SA로 표시하였다. 각 모의 실험에서 사용된 매개 변수는 SA 알고리듬의 경우 반복횟수는 80회, 초기 온도는 1.0, 냉각 속도는 0.92 그리고 목표 효율은 1.0으로 하였으며, TS 알고리듬의 터부 조건으로 식 (7)의 비용함수를 이용하였다. 이 과정에서, 열망조건은 무시하였으며, 정지 조건은 3회 반복할 경우를 선택하였다. 이렇게 생성된 TS 알고리듬의 결과 패턴을 SA 알고리듬의 입력 패턴으로 사용하

여 최적화된 홀로그램을 얻었다.

그림 5와 그림 6에서 기존의 SA 알고리듬과 제안한 알고리듬을 비교한 결과 제안한 알고리듬이 기존의 SA 알고리듬을 이용하였을 때보다 전체적으로 밝게 나타났으며, 신호창 내부의 잡음이 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

표 1과 표 2는 SA 알고리듬과 제안한 알고리듬에 대해 SA 알고리듬의 냉각 속도와 반복 횟수를 다르게 하여 얻은 회절 효율과 이진 영상에 대한 균일도를 나타냈다. 표 1과 2에서 역시 제안한 알고리듬이 SA 알고리듬을 이용하였을 때보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 그림 7에서 이진 영상에 대한 회절 효율값을 그래프로 표현하였다. 여기에서 제안

표 1. SA 알고리듬과 제안한 알고리듬의 회절 효율 (%)

냉각 속도	실험영상	반복횟수					
		60		70		80	
		SA	TS +SA	SA	TS +SA	SA	TS +SA
0.91	이진영상	75.5	78.3	77.2	79.0	78.0	79.6
	명암도영상	69.6	75.4	74.9	79.4	76.9	79.9
0.92	이진영상	74.4	75.4	76.4	78.7	78.0	79.7
	명암도영상	62.3	68.0	69.9	76.2	74.7	79.2
0.93	이진영상	62.9	67.5	72.3	75.0	75.5	78.5
	명암도영상	53.9	58.1	63.5	69.5	71.6	76.0

표 2. SA 알고리듬과 제안한 알고리듬의 균일도 (%)

냉각 속도	반복횟수					
	60		70		80	
	SA	TS +SA	SA	TS +SA	SA	TS +SA
0.91	0.592	0.544	0.587	0.537	0.564	0.530
0.92	0.556	0.527	0.577	0.512	0.555	0.532
0.93	0.591	0.554	0.581	0.537	0.486	0.444

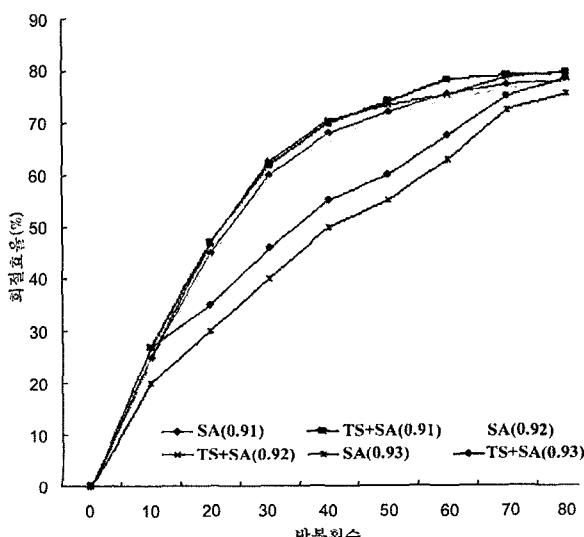
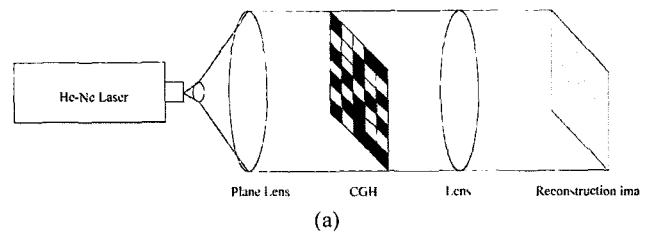


그림 7. 이진 영상에 대한 SA 알고리듬과 제안한 알고리듬의 회절 효율.

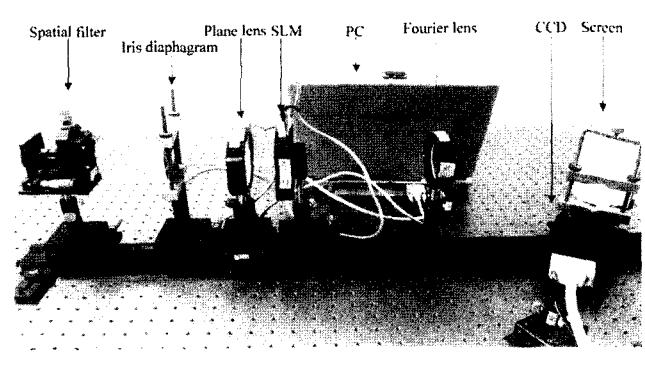
한 알고리듬의 회절 효율과 균일도는 반복 횟수를 3회로 수행하여 얻은 TS 알고리듬의 결과 패턴을 SA 알고리듬의 초기 패턴으로 이용하여 계산한 결과이다.

그림 8은 광 실험을 위한 구성도와 실험에 사용된 시스템으로 실험에 사용된 레이저 범위 파장이 632.8 nm인 선형빔이며, 공간 광 변조기는 HoloEye사의 LC2002 LCD를 사용하였다. CCD는 픽셀 크기가 1300×1030이며, 각각의 셀 크기는 6.7 μm×6.7 μm인 PULiX 사의 TM-1320을 사용하여 컴퓨터에서 제작된 CGH를 공간 광 변조기에 입력하고 푸리에 렌즈를 통과시켜 재생된 영상을 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였다.

그림 9는 SA 알고리듬과 제안한 알고리듬을 이용하여 설계된 홀로그램 패턴으로 그림 (a)는 SA 알고리듬을 이용한 경우이며, 그림 (b)는 제안한 알고리듬으로 설계된 홀로그램이다. 그림 10과 그림 11에서 그림 (a)는 광 실험 결과와 목표 영상을 비교하기 위해 컴퓨터로 재생된 목표 영상을 나타내



(a)



(b)

그림 8. 광 실험도.

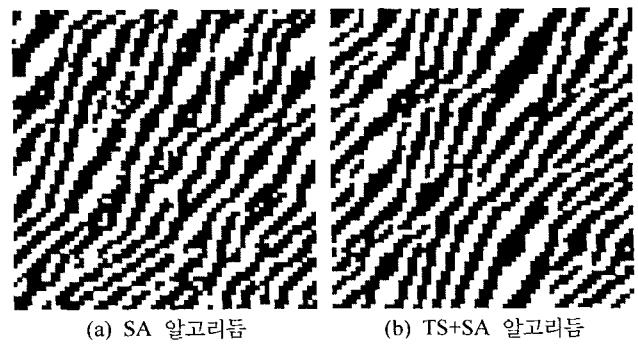


그림 9. 컴퓨터 형성 홀로그램.

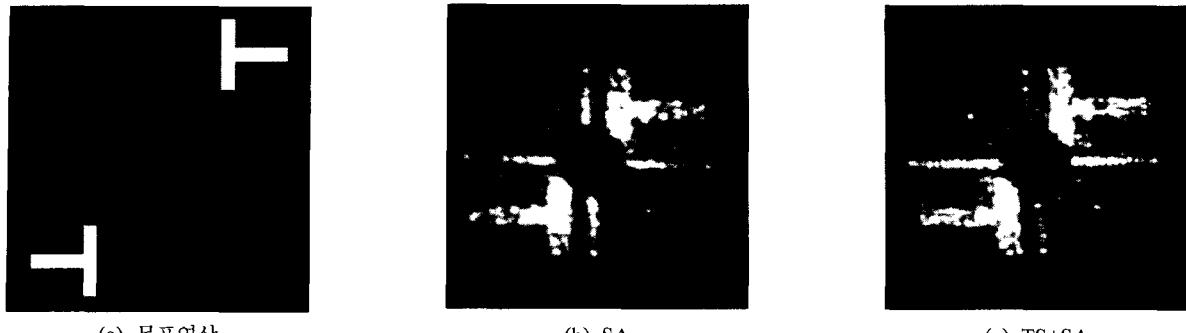


그림 10. 재생된 이진 영상.



그림 11. 재생된 명암도 영상.

며, 그림 (b)와 (c)는 광 실험을 통해 얻어진 결과 영상이다. 재생 영상은 푸리에 렌즈를 통한 빔을 공간 필터링을 하여 DC 텁을 차단하여 획득하였다.

회절 효율과 균일도에 대해서 제안한 알고리듬이 SA 알고리듬만을 독립적으로 사용하였을 때보다 향상된 결과를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10과 11에서 얻어진 CCD 카메라의 양자화 오차와 잡음으로 인해 모의실험에서 얻은 결과와 차이가 나는 것을 확인하였다. 광 실험을 통해 재생된 영상을 비교한 결과 이진 영상의 경우에서는 제안한 알고리듬을 이용하여 재생한 영상이 SA 알고리듬만에 대해서 영상의 모서리 부분에서 더 충실하게 나타났으며, 명암도 영상에 있어서는 SA 알고리듬의 경우 중간값의 밝기를 가져야 할 부분에서 잡음이 나타나 밝기의 감소하는 정도가 불규칙하게 나타나는데 반하여 제안한 알고리듬을 이용하여 재생한 영상에서는 점차적으로 어두워지는 명암도 패턴을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 SA 알고리듬과 TS 알고리듬을 이용하여 향상된 효율을 갖는 BPCGH를 설계하기 위한 방법을 제안하였다. SA 알고리듬은 무작위로 구성된 초기값을 이용하여 최적화를 수행하지만 일정 반복 횟수를 넘을 경우에는 회절 효율이 증가되지 않기 때문에 다른 알고리듬과 결합이 필요하다.

TS 알고리듬은 열망 조건과 터부 목록을 사용하지 않고, 터부 조건만으로도 원하는 해를 찾을 수 있으므로, SA 알고리듬과 결합하여 최적화를 수행하기에 적합하다. TS 알고리듬과 SA 알고리듬을 조합하여 최적화를 수행하기 위해서 TS 알고리듬을 이용하여 목표 영상을 재생할 수 있는 홀로 그램 패턴에 균일한 패턴을 생성하고, 이를 SA 알고리듬의 무작위로 구성된 초기 패턴 대신에 사용하였다. 제안한 알고리듬과 SA 알고리듬의 성능 평가를 위해서 컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 수행하였다. 그 결과 제안한 알고리듬이 SA 알고리듬만을 이용하였을 때보다 향상된 회절 효율을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*(McGraw-Hill, New York, 2nd Ed., 1996) Chap. 8.
- [2] B. R. Brown and A. W. Lohman, "Complex apatial filter with binary mask," *Appl. Opt.*, vol. 5, pp. 967-969, 1966.
- [3] R. Eschbach, "Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms", *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 26, pp. 3702-3710, Sep. 1991.
- [4] F. Wyrowski, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 5, no. 7, pp. 1058-1065, July, 1988.
- [5] B. B. Chhetri, "Iterative stepwise binarization of digital amplitude holograms with added energy to the signal

- window," *Opt. Eng.*, vol. 40., no. 12, Dec. 2001.
- [6] M. R. Feldman and C. C. Guest, "Iterative encoding of high efficiency holograms for generation of spot arrays," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 497-481, 1989.
- [7] 김동호, "변형된 SA 알고리듬을 이용한 이진 위상 컴퓨터 형성 훌로그램의 합성," 경북대학교 석사학위논문, 1993.
- [8] Y. Jeon, "Application of simulated annealing and tabu search for loss minimization in distribution systems."
- ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*. 26 (2004), pp. 9-18.
- [9] 조창섭, "GA와 SA 알고리듬의 조합을 이용한 최적의 BPCGH의 설계", *한국통신학회*, vol. 28, no. 5C, 2003.
- [10] F. Glover, "Tabu Search-Part I" *ORSA Journal on Computing*, vol. 1., no. 3., pp. 190-206, Summer 1989.
- [11] H. Kim, "An algorithm for thermal unit maintenance scheduling through combined use of GA SA and TS", *IEEE Trans. PWRs*, vol. 12, no. 1, pp. 329-335, Feb 1997.

## Improvement of the efficiency from Computer-Generated Holograms by using TS algorithm and SA algorithm

Chang-Sub Cho, Chang-Mok Shin<sup>†</sup>, Kyu-Bo Cho, and Soo-Joong Kim

*School of Electronical Engineering & Computer Science, Kyungpook Nat'l Univ.*

<sup>†</sup>*E-mail: lensless@ee.knu.ac.kr*

Cheol-Su Kim

*School of Computer Multimedia, Kyungju Univ.*

(Received Juny 29, 2004, Revised manuscript January 6, 2005)

In this paper, we propose a method for optimizing a computer-generated hologram(CGH) by combining the Tabu Search(TS) algorithm with the Simulated Annealing(SA) algorithm. By replacing an initial random pattern of the SA algorithm with an approximately ideal hologram pattern of the TS algorithm, we design a CGH which has high diffraction efficiency(DE). We compared the performance of the proposed algorithm with the SA algorithm using computer simulation and an optical experiment. As a result, we confirmed diffraction efficiency and uniformity to be enhanced in the proposed algorithm.

OCIS Codes : 090.1760, 100.2980, 100.3010.