

論文96-33B-6-16

Simulated Annealing 알고리즘에 의한 위상격자를 이용한 실시간 광 영상 생성

(Real Time Optical Image Generation Using Phase Grating with Simulated Annealing Algorithm)

金 喆 洙 *, 金正雨 **, 裴長根 ***, 金秀重 **

(Cheol Su Kim, Jeong Woo Kim, Jang Keun Bae, and Soo Joong Kim)

요 약

본 논문에서는 SA 알고리즘을 이용하여 영상 생성을 위한 이진 위상격자를 설계하였고, LCTV를 위상 변조기로 사용하였다. 그리고 컴퓨터로 LCTV를 제어하여 실시간적으로 광 영상을 생성하였다. SA 알고리즘에 사용되는 많은 변수들은 경험적 방법이 아닌 비용함수의 평균 변화량으로부터 결정하였으며, LCTV를 위상 변조기로 사용할 수 있음을 Mach-Zehnder 간섭실험을 통하여 확인하였다. 컴퓨터로 제어되는 LCTV에 위상격자들을 인가하여 푸리에 변환하므로써 다양한 광 영상들을 실시간적으로 생성하였다. 이들은 신경망에서 광연결이나 체적 홀로그래프에서 정보를 주소화하는 등에 이용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we designed binary phase grating with SA(simulated annealing) algorithm for image generation, and used LCTV(liquid crystal television) as phase modulator. We generated optical image using LCTV which controlled by personal computer in real time. Many parameters in SA algorithm are determined by average deviation of the cost function, not experimental method. It was confirmed that the LCTV could be used as a phase modulator through Mach-Zehnder interferometry experiment. The various optical images are generated in real time by Fourier transforming of the phase gratings on LCTV which is controlled by personal computer and they can be used for optical interconnection in a neural network and addressing information in a volume hologram etc.

I. 서 론

위상격자는 간섭계, 다중영상 생성, 광학적 비디오

* 正會員, 金泉專門大學 電波通信科

(Dept. of Wave Communication, Kimchon Junior College)

** 正會員, 慶北大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics, Kyungpook National University)

*** 正會員, 龜尾專門大學 電子科

(Dept. of Electronics, Kumi Junior College)

接受日字:1995年8月5日, 수정완료일:1996年5月29日

플레이어 등에서 빔 분할기로 사용되는 광 소자이다¹¹

¹. 근래에 위상격자를 반도체 공정으로 제작하는 대신 제작이 용이하고 효율이 높은 공간 광 변조기(spatial light modulator;SLM)에 위상을 기록하는 연구가 활발하고¹²¹, 효율을 증가시키는 알고리즘의 개발 및 개선에 관해서도 연구를 많이 하고 있다^{13,41}. 광 영상 생성 위상격자의 설계방법에는 격자구조에 따라 위상이 한 주기동안 '0'과 ' π '사이를 천이하는 형태를 갖는 방법¹⁵¹과 격자를 구성하는 화소의 크기는 일정하게 하고 화소값을 제어하는 방법¹⁴¹이 있다. 전자는 설계가 용이하나 다양한 광 영상을 생성하기 어렵기 때문에 주로 집배열 생성에 이용된다. 후자는 제작은 다소 복

잡하나 다양한 형태의 광 영상 뿐만 아니라 점배열 생성시 각 빔의 세기를 조정할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 다양한 공간 광 변조기의 개발¹⁶⁾로 쉽게 위상을 표현할 수 있어서 후자를 전자보다 더 널리 이용하고 있다. 위상격자에서 위상은 기록매질의 두께를 제어하거나 매질의 굴절률을 변화시켜 표현하며 연속적인 위상의 제어가 어렵기 때문에 양자화가 필요하다. 그러나 양자화에 따른 정보의 손실이 회절효율을 저하시켜 광 영상 생성시 잡음으로 나타나므로 이를 최소화해야 한다. 양자화에 따른 효율감소와 잡음을 최소화하는 대표적인 방법이 SA(simulated annealing) 알고리즘이다. SA 알고리즘은 반복적인 기법을 통하여 양자화의 최적해를 찾아가는 방법으로서 신경망, 영상 처리분야 등에서 응용되고 있다¹⁷⁾. 이 알고리즘은 최적해를 구하기 위한 많은 변수들이 존재하며 이들을 선정하는 것이 중요하다. 지금까지 발표된 많은 논문들에서는 이 값들을 경험을 통해서 얻었다^{13,14)}.

본 논문에서는 SA 알고리즘을 도입하여 광 영상 생성 이진 위상격자 설계시 생성하려는 영상에 따라 적합한 비용함수를 정의하였고, 비용함수의 평균변화량을 계산하여 이 알고리즘에 사용되는 변수들인 초기온도, 냉각속도, 그리고 반복횟수를 결정하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 변수들이 SA 알고리즘에 미치는 영향을 분석하였다. 제안된 SA 알고리즘으로 효율이 높은 영상 생성 이진 위상격자를 설계할 수 있고, 간섭실험을 통하여 LCTV를 위상변조기로 사용할 수 있음을 확인한 후 이를 이용하여 광 영상을 실시간적으로 생성할 수 있음을 보였다. 만약 위상격자 설계시 위상을 표현하는 단계를 증가시킨다면 회절효율을 증가시킬 수 있고, 이진 위상격자에서 발생하는 역상을 없앨 수 있다¹⁸⁾.

II. SA 알고리즘을 이용한 위상격자의 설계

생성하려는 광 영상 함수 $h(x, y)$ 와 위상격자의 투과 함수 $H(u, v)$ 와 사이에는 푸리에 변환 관계가 있고 이를 이산적(discrete)으로 표현하면

$$h_{mn} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp\left(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right) \quad (1)$$

와 같다. 여기서 H_{kl} 은 위상격자 투과함수 $H(u, v)$ 의 (k, l) 번째 화소 값이며, 이진 위상격자일 때에는 $(e^{j0},$

$e^{j\pi})$ 의 값을 갖는다. h_{mn} 은 광 영상 함수 $h(x, y)$ 의 (m, n) 위치에서의 크기를 나타낸다. 위상의 양자화로 인한 오차를 최소화하여 목표값에 근접하도록 위상격자를 구성하기 위해 SA 알고리즘을 도입하였다. SA 알고리즘은 반복적인 기법을 통해 양자화의 최적해를 찾아가는 방법으로 많은 변수들이 사용되며 이들의 선정이 중요하다. 사용되는 변수들 중 온도의 냉각속도 D_t 는 0.9 이상의 값이 되면 국소 최적해에 빠지지 않는다고 알려져 있으며 초기온도와 반복횟수는 경험을 통해서 선정하였다. 또 SA 알고리즘에서는 비용함수를 도입하여 반복과정중 국소 최적해에서 벗어날 수 있도록 한 것이 일반적 반복기법을 이용하는 알고리즘과 큰 차이점이다. 본 논문에서는 SA 알고리즘의 많은 변수들을 경험적으로 얻어 최적해를 구하지 못하는 단점을 보완하기 위해 생성하려는 영상에 따라 적절한 비용함수를 정의 하였으며 예상되는 가장 이상적인 목표값을 계산하고, 비용함수의 평균 변화량을 계산하여 초기온도, 온도의 냉각속도, 그리고 반복횟수를 결정하는 방법을 제안하였다. 먼저 점배열 생성을 위한 비용함수는 반복 과정을 통해 재생된 광 영상이 목표값에 접근하도록 다음 식으로 정의한다.

$$E = \sum_{m=0}^{A-1} \sum_{n=0}^{B-1} \left(\frac{\eta}{AB} - P_{mn} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 η 는 목표효율을 나타내고 이상적인 경우에는 '1'의 값을 가진다. 목표효율(target efficiency;TE)을 이상적으로 선정했을 때는 그 값에 수렴하는 정도가 떨어지므로, 이를 적절히 선택하면 이상적으로 선정했을 때보다 회절효율(diffraction efficiency;DE)을 높일 수 있다. A 와 B 는 가로와 세로 방향의 점배열 수를 나타내고, P_{mn} 은 (m, n) 위치에서 점배열의 정규화된 세기이다. 또한 비용함수 계산시 원하는 위치에서의 세기만을 계산에 포함시켜 계산하는 시간을 줄였다. 그리고 일반 문자영상이나 명암도 영상 생성을 위한 비용함수는 제한된 영역내에서 목표영상과 재생된 광 영상 사이의 평균지수오차 E 로 정의한다¹¹⁾.

$$E = \frac{1}{AB} \sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} |f_{mn}|^2 - |h_{mn}|^2 \quad (3-a)$$

$$c \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |f_{mn}|^2 = e_i \quad (3-b)$$

$$|f_{mn}|^2 = c |h_{mn}|^2 \quad (3-c)$$

여기서 e_i 는 목표효율을 나타내고, A 와 B 는 각각 목표 영상의 가로 및 세로의 크기를 나타낸다. c 는 목표영상 f'_{mn} 의 전체 에너지가 e_i 가 되도록 하는 제어상수이며, 전처리 과정에서 영상에 따라 달라진다. 이 비용함수는 제한된 영역내에서 목표영상을 찾아가도록 하므로써 관심영역 밖의 배경잡음을 줄여 더욱 높은 효율을 가질 수 있게 한다. 이진 위상격자 설계를 위한 SA 알고리즘의 수행과정은 다음과 같다.

- ① 위상격자의 초기 투과함수 H_{kl} 을 2 단계의 값으로 무작위로 선정하고, 비용함수 E^{old} 를 계산한다.
- ② 초기 비용함수의 평균 변화량을 계산하고, 이로부터 초기온도, 온도의 냉각속도, 그리고 반복횟수를 결정하고 전체 비용함수의 수렴과정을 예측한다.
- ③ 위상격자 투과함수의 한 화소 값을 바꾼 후 비용함수 E^{new} 를 계산하고 아래의 조건을 판단하여 수용 여부를 결정한다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= E^{new} - E^{old} \\ \Delta E < 0 & \quad \text{무조건 수용} \\ \Delta E \geq 0 & \quad \text{조건부 수용} \end{aligned} \quad (4)$$

- ④ 투과함수의 인접한 화소를 바꾸고 반복횟수만큼 ③의 과정을 반복한다.

과정 ③에서 비용함수의 변화량이 양수 일때에도 조건부 수용을 하여 국소 최적해에 빠지지 않도록 하였다. 수용여부는 아래와 같이 표현되는 볼츠만 확률분포(Boltzman probability distribution)와 무작위로 발생된 0~1 사이의 값과 비교하여 결정하였다.

$$P(\Delta E) = \exp(-\Delta E / T_n), \quad T_n = (D)^n T_{init} \quad (5)$$

여기서 T_n 는 n 번째 반복횟수의 온도이고, T_{init} 는 초기 온도이다. 식 (5)에서 확률 $P(\Delta E)$ 는 온도와 비용함수의 변화량의 함수이며, 반복과정의 초기에는 거의 '1'에 가깝게 두어 조건부 수용을 받아들이고, 말기에는 배제하도록 초기온도와 반복횟수를 결정하였다. 그리고 투과함수 H_{kl} 의 한 화소가 바뀔때마다 재생된 광 영상 함수 값의 변화는 푸리에 역변환 대신 그 순간의 변화량만을 가감하여 많은 시간을 절감하였다. 이를 수식으로 나타내면

$$h_{mn}^{new} = h_{mn}^{old} - t H_{kl} \exp\left(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right) \quad (6)$$

이다. 여기서 t 는 현재 H_{kl} 의 값과 다음에 나올 H_{kl} 의 값에 따라 결정되며, m, n, k , 그리고 l 은 각각 0, 1, ..., $N-1$ 범위의 값을 가지는 정수이며, $mk + nl$ 은 $2(N^2 - 2N + 1)$ 의 범위를 갖는 정수이다. 그리고 지수함수는 사인함수와 코사인함수의 합으로 표시되므로 주기 N 인 삼각함수를 미리 계산하여 N 개의 배열에 저장시켜 반복과정중 호출하여 사용하므로써 계산시간을 절감했다. 이와같은 방법으로 비용함수의 평균변화량을 계산하여 전체 비용함수의 수렴분포를 예측하였으며, 그 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)는 3×3 점배열 생성을 위한 비용함수의 수렴분포 예상 곡선이며, 그림 2(b)는 별 영상 생성을 위한 비용함수의 수렴분포 예상 곡선이다. 여기서 사용된 변수들사이에는 상호의존 관계가 있으므로 이들 중 반복횟수는 100회로 고정시켜 두고 초기온도와 온도의 냉각속도가 비용함수의 수렴분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 두 변수중 냉각속도의 변화에 따른 수렴분포의 변화가 초기온도의 변화에 따른 수렴분포의 변화보다 심하므로 성능결정에 더 중요한 영향을 미치는 것을 예상할 수 있다. 예상한 수렴분포곡선 중에서 적절한 한 곡선을 선택하고, 그때 사용된 변수들이 실제 알고리즘에 사용된다. 3×3 점배열 생성을 위해 SA 알고리즘에 사용되는 적절한 변수값들은 그림 1(a)로 부터 반복횟수(N)는 100회, 초기온도(T_{init})는 1.0, 그리고 냉각속도(D)는 0.91로 결정하였다. 별 영상 생성을 위해 SA 알고리즘에 사용되는 적절한 변수값들은 그림 1(b)로 부터 반복횟수(N)는 100회, 초기온도(T_{init})는 3.0, 그리고 냉각속도(D)는 0.91로 결정하였다. 초기온도, 온도의 냉각속도 및 목표효율의 변화량에 따른 각 영상들의 회절효율을 컴퓨터 시뮬레이션하여 표 1에 나타내었다. 그리고 점배열 영상의 경우에는 회절효율과 더불어 균일도가 성능평가의 중요한 요소이므로 아래와 같이 정의하였으며, 그 결과는 표 1에 나타내었다.

$$U = \frac{P_{max} - P_{min}}{2P_{ave}} \times 100 \% \quad (7)$$

여기서 P_{max} , P_{min} , P_{ave} 는 점배열 영상의 최대값, 최소값, 그리고 평균값을 나타낸다. 표 1을 통하여 냉각속도가 성능결정에 더 중요한 변수임을 검증하였으며, 또한 목표효율 적절히 설정하므로써 회절 효율을 높일 수 있음을 확인하였다. 실제로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후 비용함수의 수렴분포로서 예측된 비용함수의

결과를 검증할 수 있었으며, 이를 그림 2에 나타내었다.

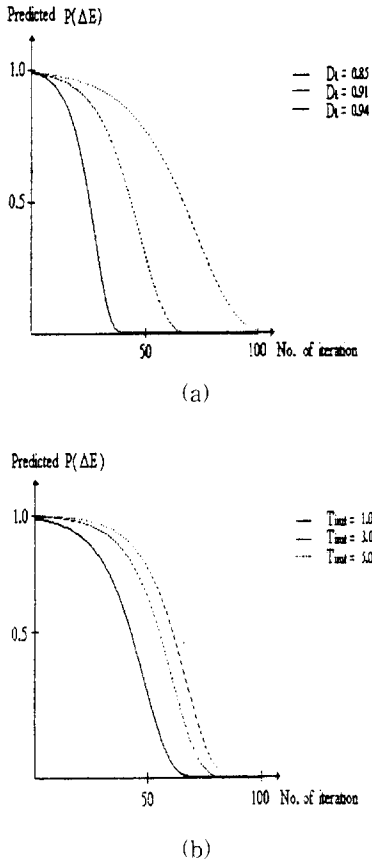


그림 1. 예상된 비용함수의 확률분포 비교
 (a) 냉각속도의 변화에 따른 비용함수의 확률분포($\Delta E = 0.015$, $T_{init} = 1.0$)
 (b) 초기온도의 변화에 따른 비용함수의 확률분포($\Delta E = 0.1$, $D_t = 0.91$)

Fig. 1. The comparison of probability distribution of predicted cost functions.
 (a) probability distribution of cost function for a variation of the cooling speed, ($\Delta E = 0.015$, $T_{init} = 1.0$)
 (b) probability distribution of practical cost function for a variation of the initial temperature. ($\Delta E = 0.1$, $D_t = 0.91$)

III. 광 실험결과 및 고찰

실시간적으로 광 영상을 생성하기 위해 공간 광 변조기로 사용한 LCTV는 Epson사의 ET-20으로 화면의 크기는 $38.4\text{mm} \times 28.6\text{mm}$, 화소의 크기는 $160\mu\text{m} \times 130\mu\text{m}$ 이며 화소수는 240×220 개이다. 이 LCTV는 화소 내에 투명한 TFT(thin film transistor)가 내장되어 액정에 인가된 전압을 한 영상화면 동안 거의 일정하

게 유지하는 특성을 가진 active matrix형이다. LCTV의 이진 위상변조 특성을 조사하기 위해 그림 3과 같은 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다.

표 1. 냉각속도, 목표효율 및 초기온도의 변화에 따른 영상들의 회절효율

Table 1. Diffraction efficiency of the images for the variation of the cooling speed, target efficiency and initial temperature.

변수 영상	비용함수의 평균 변화량 (ΔE)	반복 횟수 (N)	냉각 속도 (D_t)	초기 온도 (T_{init})	목표 효율 (TE)	회절 효율 (DE)	균일도 (%)(U)
3×3 점배열	0.015	100	0.85	1.0	1.0	0.770	2.751
					0.85	0.769	0.871
			0.91		1.0	0.769	3.332
					0.85	0.770	1.262
			0.94		1.0	0.625	3.436
					0.85	0.553	5.286
별	0.1	100	0.91	1.0	1.0	0.759	-
					0.85	0.764	-
				3.0	1.0	0.766	-
					0.85	0.759	-
				5.0	1.0	0.765	-
					0.85	0.757	-

이때 사용된 $\lambda/2$ 위상 지연판은 레이저의 편광방향과 LCTV 표면의 액정방향을 평행하게 하기위한 것이며, 간섭계의 한쪽 경로에 LCTV를 두어 전압의 인가에 따른 간섭무늬의 변화를 관측하였다. 그림 4(a)는 LCTV에 전압을 인가하지 않았을 때의 간섭무늬이고 그림 4(b)는 LCTV에 수평 막대모양의 영상에 전압을 인가하였을 때의 간섭무늬이다. 전압이 가해진 부분을 통과한 빛이 거의 π 만큼 위상차가 생기므로 위상 변조기로 사용할 수 있었다. 위상격자로 부터 광 영상을 생성하기 위한 실험 구성도는 그림 5와 같다. 위상격자는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계하여 CGA(color graphic adapter) 카드가 장착된 랩탑 컴퓨터 모니터에 디스플레이 한 후 TV 신호로 변환하여 LCTV에 입력시켰다. 그러나 CGA 카드는 4레벨 명암만을 표현할 수 있기 때문에 원하는 명암도 영상을 표현할 수 없다. 즉 위상 레벨을 연속에 가깝게 제어할 수 없다. 만약 Frame Grabber를 사용하여 위상격자를 표현한다면 CGA 카드를 사용하였을 때 보다 정확하게 위상

을 표현할 수 있을 뿐만 아니라 표현할 수 있는 위상 레벨도 증가시킬 수 있을 것이다.

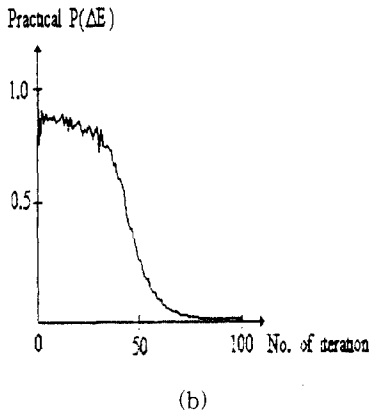
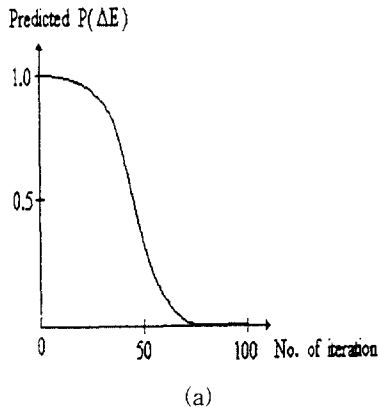


그림 2. 3×3 점배열 생성을 위한 비용함수의 확률 분포 비교 ($\Delta E = 0.015$, $T_{init} = 1.0$, $Dt = 0.91$)

(a) 예상된 비용함수의 확률분포 (b) 실제 비용함수의 확률분포

Fig. 2. The comparison of probability distribution of cost functions for 3×3 spot array generation. ($\Delta E = 0.015$, $T_{init} = 1.0$, $Dt = 0.91$)

(a) probability distribution of predicted cost function, (b) probability distribution of practical cost function.

그리고 핀홀(pinhole)은 LCTV의 투명전극에 의한 고조파 재생영상을 제거하기 위한 것이다. 그림 6은 SA 알고리즘을 이용하여 설계된 위상격자들이며, 검은 부분은 전압이 인가된 ‘ π ’의 위상을 나타내고 흰 부분은 ‘0’의 위상을 나타낸다. 그림 7은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 64×64 광영상들이다. 그림 7(a)는 3×3 점배열 영상이며, 그림 7(b)는 17×17 크기를 갖는 이

진 별 영상이며, 그림 7 (c)는 16×16 크기를 갖고 4 개의 레벨을 가지는 명암도 시험 영상이다. 이진 영상에 비해 명암도 영상이 복잡하므로 목표값에 수렴하는 정도가 떨어지고, 재생결과에 많은 잡음이 섞여 있음을 볼 수 있다.

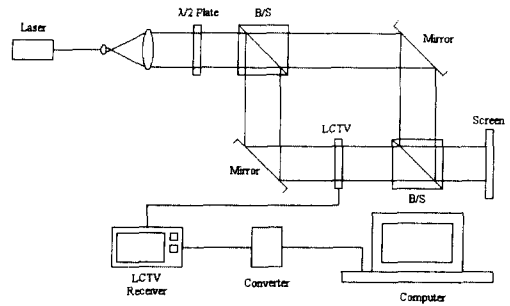


그림 3. Mach-Zehnder 간섭계
Fig. 3. Mach-Zehnder interferometer.

만약 위상을 표현하는 단계를 증가시킨다면 보다 깨끗한 영상을 재생시킬 수 있을 뿐만 아니라 이진 위상 격자에서 생기는 역상도 없앨 수 있을 것이다. 그림 8은 광 실험을 통해 생성된 광 영상들이며, 광 실험 결과에서 나타난 DC성분과 스펙클은 CGA카드를 장착하고 있는 랩탑 컴퓨터가 위상을 정확하게 표현할 수 없고, LCTV의 화소들사이의 투명전극부분과 액정의 불균일성에 의해 위상이 정확하지 않게 표현되지 않았기 때문에 나타나는 현상이라고 추측된다. 그러나 반도체 공정을 이용하여 위상격자를 제작할 때 보다 공간 광 변조기인 LCTV를 이용하므로써 실시간으로 광 영상을 생성할 수 있었다.

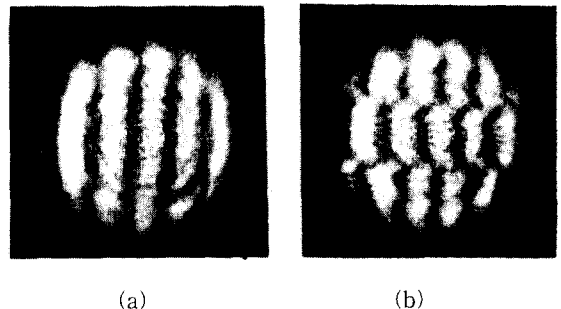


그림 4. 간섭무늬 (a) 전압을 인가하지 않았을 때 (b) 전압을 인가했을 때
Fig. 4. Interferograms (a) when voltage is not applied, (b) when voltage is applied.

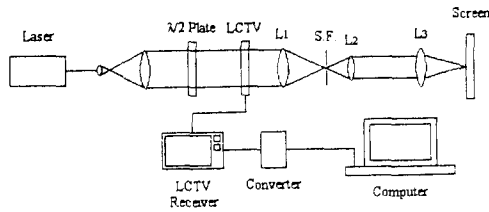


그림 5. 광 영상 생성을 위한 실험 구성도
Fig. 5. Schematic diagram of experimental system for optical image generation.

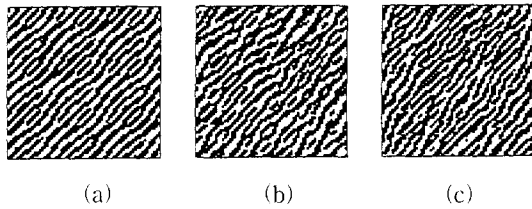


그림 6. 광 영상 생성을 위한 이진 위상격자
(a) 3×3 점배열 생성을 위한 이진 위상격자 (b) 별 영상 생성을 위한 이진 위상격자 (c) 명암도 시험 영상 생성을 위한 이진 위상격자
Fig. 6. Binary phase gratings for optical image generation.
(a) binary phase grating for 3×3 spot array generation, (b) binary phase grating for star image generation. (c) binary phase grating for gray test image generation.

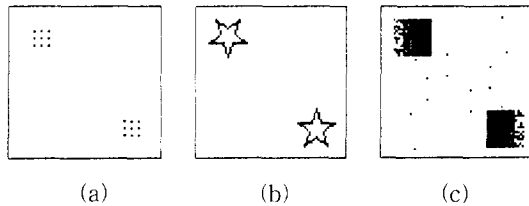


그림 7. 컴퓨터 시뮬레이션 결과
(a) 3×3 점배열 (b) 별 영상 (c) 명암도 시험영상
Fig. 7. The results of computer simulation.
(a) 3×3 spot array, (b) star image, (c) gray test image.

IV. 결 론

본 연구에서는 SA 알고리즘에서 사용되는 비용함수는 생성하고자 하는 광 영상에 따라 적절히 정의하였

고, 변수들인 초기온도와 반복횟수는 경험적인 방법이 아닌 비용함수의 평균 변화량을 계산하여 결정하므로써 여러번의 시행착오를 거치는 시간을 줄일 수 있음을 보였으며, 이 변수들이 SA 알고리즘에 미치는 영향을 분석하였다.

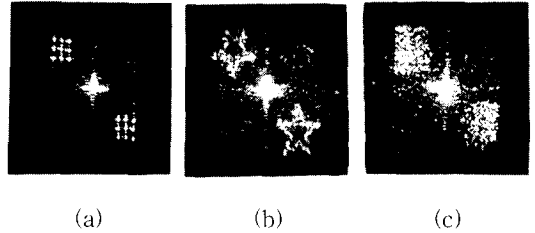


그림 8. 광 실험 결과
(a) 3×3 점배열 (b) 별 영상 (c) 명암도 시험영상
Fig. 8. The results of optical experiment.
(a) 3×3 spot array, (b) star image, (c) gray test image.

또한 LCTV를 위상 변조기로 사용하기 위해 인가 전압에 따른 위상차를 간섭실험을 통하여 확인하였고, 이진 위상격자 설계시 발생하는 양자화 손실을 최소화하기 위해 SA 알고리즘으로 설계된 위상격자를 LCTV에 인가하여 푸리에 변환하므로써 원하는 광 영상을 실시간적으로 얻을 수 있었다. 만약 인가전압을 달리하여 다 단계로 위상을 표시하면 훨씬 효율이 좋은 광 영상을 생성할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김철수, 김정우, 김동호, 김수중, “효율적인 SA 알고리즘을 이용한 위상 회절격자의 설계,” 제 6 회 신호처리합동 학술대회 논문집, pp. 160-163, 1993
[2] J. Amako, T. Sonehara, “Kinofom using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator,” *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 32, pp. 4622-4628, 1991.
[3] 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.
[4] A. G. Kirk, T. J. Mall, “Design of binary

computer generated holograms by simulated annealing : coding density and reconstruction error," *Opt. Comm.*, vol. 94, no. 6, pp. 491-496, 1992.

- [5] J. Jahn, M. M. Downs, M. E. Prise, N. Streibl, and S. J. Walker, "Dammann gratings for laser beam shaping," *Opt. Eng.*, vol. 28, no. 12, pp. 1267-1275, 1989.
- [6] 배 장근, "액정 텔레비전 위상변조기를 이용한 오차확산 이진위상 홀로그래프의 광학적 구현," *경북대학교 석사학위 논문*, 1989

[7] 김철수, 김동호, 김정우, 배장근, 이재곤, 김수중, "효율적인 Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 이진 위상 컴퓨터 형성 홀로그래프의 합성," *대한 전자 공학회 논문지*, 제 32 권 A편 제 2호, pp. 111-119, 1995

[8] L. G. Neto, D. Roberge, and Y. Sheng, "Programmable optical phase-mostly holograms with coupled-mode modulation liquid-crystal television", *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 11, pp. 1944-1950, 1995.

— 저 자 소 개 —



金 喆 洙(正會員)

1966年 9月 4日生. 1989年 2月 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991年 2月 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993年 2月 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1994

年 4月 ~ 1995년 2월 경북대학교 전자공학과 조교. 1995年 3月 ~ 현재 김천전문대학 전파통신과 전임강사. 주관심분야는 광 메모리, 홀로그래프, 광 신호처리 등임

裴 長 根(正會員) 第 31 卷 第 6 號 參照

1994년 3월 ~ 현재 구미전문대학 전자과 전임강사

金 正 雨(正會員)

1964년 5월 10일생. 1987年 2月 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989年 2月 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1995年 8月 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1996年 3月 ~ 현재 동양대학교 전자 제어통신공학부 전임강사. 주관심분야는 광 형태인식 및 광 신경회로망 등임

金 秀 重(正會員) 第 27 卷 第 4 號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 교수