

# 회절무늬소자 설계를 위한 2단계 iterative Fourier transform 알고리즘의 성능

## Performance of the two-stage iterative Fourier transform algorithm for designing diffractive pattern elements

성승훈, 조두진  
아주대학교 물리학과  
sulit@madang.ajou.ac.kr

회절무늬소자(DPE, diffractive pattern elements)는 프라운호퍼 회절에 의하여 임의의 주어진 세기무늬를 발생시키는 위상형 회절광학소자로서 키노폼(kinoform), 컴퓨터 푸리에 홀로그램 등으로 불리우며, 광정보처리, 광연결, 레이저가공 등에서 중요한 역할을 하고 있다. 고성능 DPE를 설계하는 많은 방법들이 제안되었는데, 다위상(multi-phase) 소자의 경우 iterative Fourier transform 알고리즘(IFTA)과 이를 변형한 알고리즘이 가장 널리 사용된다. 수렴속도가 빠른 hybrid input-output 알고리즘(HIOA)과 SNR, 균일도, 회절효율 등에서 좋은 결과를 보이는 새로운 Pnoise 알고리즘(NPA)을 결합한 2단계 iterative Fourier transform 알고리즘(NPA-HIOA)은 임의의 세기무늬에 대하여 우수한 성능을 보인 바 있다.[1] 최근에 제안된 memory-matrix-based identification methodology(MMBI)[2]는 우수한 성능을 보이는 nonlinear least squares(NLS)와 phase-shifting quantization 방법[3]을 바탕으로 한 것으로 균일도와 SNR, Quality Factor에 있어서 기존의 우수한 알고리즘을 상당히 능가하는 것으로 알려져 있으나, NLS 때문에 계산량이 막대하여 많은 화소를 가진 세기무늬에는 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 광정보처리에 유용한 2가지의 이진세기무늬와 하나의 비축무늬에 대하여 NPA-HIOA와 MMBI의 설계 성능을 비교하였다.

NPA-HIOA의 1단계에서는 HIOA를 이용하여 대략적이고 연속적인 위상소자를 빠르게 찾는다. 반복 과정의 입력  $\bar{G}_{i+1}$ 에 IFTA와 같은 제약을 가하는 대신, 출력  $\bar{G}_i'$ 이 Fourier-domain constraints를 만족시키도록 유도한다. 즉 Fourier-domain constraints를

$$\bar{G}_{i+1} = [|\bar{G}_i| + \beta(\sqrt{I} - |\bar{G}_i'|)] e^{iz \bar{G}_i'}$$

와 같이 출력  $\bar{G}_i'$ 의 진폭이 constraints  $\sqrt{I}$ 로 부터 벗어나는 정도를 입력에 반영하는 것인데, 여기서  $\beta$ 는 반영 정도를 나타내는 매개변수이다. 2단계의 바탕이 되는 NPA에 있어서 신호영역(세기가 0이 아닌 영역)에 대해서는 Fourier-domain constraints를 그대로 적용하지만 잡음영역(세기가 0인 영역)의 경우는 최소 SNR 값에 의하여 결정되는 임계값으로 세기를 제한하여 constraints를 완화함과 동시에 회절효율을 높인다. 임계값에는 최소 SNR 값을 최적화 하기 위하여 도입하는 목표 매개변수인  $\max \text{SNR}_{\min}$ 이 관계한다. NPA-HIOA의 2단계에 있어서는 신호영역에 대해서만 1단계의 HIOA에서 적용하는 위의 Fourier-domain constraints를 적용하므로써 NPA와 HIOA를 결합 변형한다. 양자화된 위상소자의 경우, stagnation 문제를 완화하기 위하여 2단계를 다시 세부적인 10단계로 나누어 위상의 양

자화 범위를 확대시키는 단계적인 양자화 과정을 사용한다.

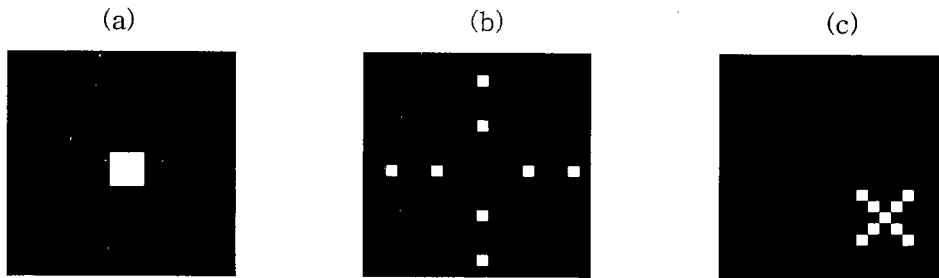


그림. 20×20 이진 세기무늬 (a) 3×3 uniform spot-array; (b) cellular hypercube pattern; (c) off-axis letter x.

본 연구에서는 MMBI를 제안한 문헌에 보고된 MMBI의 성능과 NPA-HIOA의 성능을 비교하기 위하여 위 그림에 있는 3가지 20×20 화소의 이진세기무늬를 발생하는 위상소자를 설계한다. 그림 (a)는 3×3 균일 스폿배열 또는 사각형 무늬로서 smart-pixel 광학계에서 스폿배열 발생기로 널리 사용되고, (b)는 [4, 8] reduced cellular hypercube 무늬로서 광전자 단일-명령 다중-데이터 장치의 프로세서들 사이의 통신을 가속화하는데 활용된다. 마지막으로 그림 (c)는 비축무늬의 발생 성능을 검증하고자 선택된 무늬이다. 위상소자의 위상층수는 4, 8, 16, 32, 64, 그리고 연속 위상으로 하였고, 성능을 평가하기 위한 지표로서는 최소 SNR( $SNR_{min}$ ), 균일도( $U$ ), 회절효율( $\eta$ ), 그리고 이들을

$$QF = \frac{5}{7}(1-U) \times 100 + \frac{1}{7}\eta \times 100 + \frac{1}{7}SNR_{min}$$

와 같이 결합한 Quality factor  $QF$ 를 사용하였다. NPA-HIOA의 1단계에서는 반복횟수를 40회, 2단계의 세부단계에서는 반복횟수를 각각 15회(마지막 단계는 1회)로서 총 136회로 하였다. NPA-HIOA의 매개변수인  $\beta$ 와 maxSNRmin값 그리고 초기 랜덤위상을 변화시켜 최적조건을 찾았는데, 각각의 무늬에 대한 총 시행 횟수는 480회이다. 참고로 MMBI의 경우 총 시행횟수는 600회이었다.

성능비교 결과, 그림 (a)와 (c)의 2가지 세기 무늬에 있어서는 거의 모든 위상 층수에 대하여 NPA-HIOA가 최소 SNR, 균일도, Quality factor에 있어서 우수한 성능을 보였는데, 특히 그동안 많은 세기 무늬에 대하여 관찰된 바와 같이 NPA-HIOA에 의한 연속위상 소자의 균일도는 매우 우수하게 나타났다. 회절효율에 있어서는 별 차이를 보이지 않았으며, 위상 층수의 증가에 따라 모든 평가지표가 향상되는 것으로 나타났다. 그림 (b)의 cellular hypercube 무늬에 대해서는 몇 가지 경우를 제외하고는 NPA-HIOA의 성능이 열등한 것으로 나타났는데, 위상 층수의 증가에 따라 성능이 저하되는 특이 현상도 관찰되었다. MMBI에 필요한 NLS의 계산량은 엄청나게 커서 많은 화소를 갖는 소자의 설계는 거의 불가능한 것으로 보인다. 그러나 NPA-HIOA의 계산량은 주로 FFT에 집중되어 있어서 개인용 컴퓨터를 사용하더라도 512×512 화소 정도의 무늬는 수 시간 수준의 계산시간으로 설계가능하다.

### 참고문헌

1. 정필호, 조두진, 한국광학회지, **11**, 47 (2000).
2. D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, Appl. Opt. **39**, 5921 (2000).
3. C. Chen and A. A. Sawchuk, Appl. Opt. **36**, 7297 (1997).