

Iterative Fourier transform algorithm의 개선

정재완 · 이승걸

인하대학교 공과대학 전자재료공학과

(1998년 5월 22일 받음, 1998년 10월 21일 수정본 받음)

위상 복원이나 CGH 최적 설계에 이용되는 Iterative Fourier Transform Algorithm (IFTA)의 효율성은 초기 위상 값의 선택에 따라 큰 영향을 받는데, 본 논문에서는 기존 IFTA의 초기위상 결정 방법을 수정하여 반복과정에 따른 오차의 수렴 속도, 수렴의 안정성을 개선하였다. 수정된 IFTA은 128×128 화소를 갖는 영상에서 대해 약 30% 정도 반복 횟수를 줄일 수 있었다.

I. 서 론

Iterative Fourier transform algorithm (IFTA)은 1970년대 초반 전자현미경, 파면 검출, 천문학 및 결정학 등의 분야에서 위상을 복원하여 영상을 재생할 목적으로 Gerchberg와 Saxton 등에 의해 제안되었다.^[1] 그후에도 많은 사람들이 측정된 상의 밝기, 즉 세기 정보만으로부터 최적의 위상을 복원할 목적으로 많은 관련 연구를 수행하여 왔으며,^[2,3] 1980년대 후반에는 IFTA를 computer-generated holograms (CGH)에 적용하기 위한 연구가 이루어졌다.^[4] 한편, CGH에 관한 연구는 최근까지 활발히 진행되고 있으며, 매우 빠르게 발전하고 있다. 이렇게 CGH가 발전할 수 있었던 원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데. 첫 번째는 CGH를 설계하고 평가할 수 있는 direct binary search algorithm(DBSA),^[5] simulated annealing algorithm (SAA),^[6,7] IFTA 등의^[4,8] 유용한 알고리듬이 개발되면서부터이다. 두 번째는 전자빔 묘화 기술, 전식식각 기술 등과 같은 반도체 제조 공정기술의 발달로 말미암아 매우 짧은 주기를 갖는 회절소자와 다단계 위상을 갖는 소자의 제작이 가능하게 되었기 때문이다. 따라서 CGH의 응용분야는 더욱 확대되어 광기억소자, 광신호 처리를 위한 회절광학소자, 광연결, 광통신 등의 분야에 응용되고 있다.^[9]

주어진 또는 원하는 영상의 세기로부터 위상을 복원하거나, 복원된 위상을 이용하여 CGH를 설계하는 과정에서 재생된 영상의 질은 매우 중요하다. 재생영상의 질은 회절효율과, 원래의 영상과 재생영상의 차이를 나타내는 오차로 표현할 수 있다. 따라서 높은 회절효율과 적은 오차를 갖는 재생영상을 구현하기 위해서 DBSA,^[10] IFTA, 그리고 SAA 등을 이용하고 있다. DBSA은 직접 헤로그램을 만들어내는 장점이 있으나 오랜 계산시간이 요구되는 단점이 있고, SAA은 global minimum을 찾는데 유리하여 현재 CGH를 설계하기 위해 많이 사용되고 있지만 수치 해석적으로 구현하는 것이 다소 복

잡한 면이 있다.^[6,7] 반면에 IFTA은 반복계산 과정 중에 local minimum에 빠질 가능성을 내포하고 있으나, 수치 해석적으로 쉽게 구현할 수 있으며 초기 위상을 적절히 선택하면 local minimum에 빠지는 것을 어느 정도 개선할 수도 있으므로 현재 이런 단점을 보완하여 여러 분야에 응용하기 위한 연구가 수행되고 있다.^[11-14]

본 논문에서는 먼저 기존 IFTA에 대하여 소개하고 우리가 제안한 방법에 대하여 설명할 것이다. 그리고 개선된 알고리듬에 의한 오차의 수렴과 기존 알고리듬에 의한 오차의 수렴을 모의 실험을 통해 살펴보고, 두 방법에 의한 결과를 비교할 것이다.

II. 이 론

2.1. IFTA

측정된 상의 세기 정보로부터 위상을 복원하거나, 원하는 세기 분포를 재현하기 위한 CGH의 최적 설계과정에서, 세기 정보로부터 직접 결정되는 진폭이외에도 적절한 위상 값을 찾는 것이 필요하다. 보통, 공간적인 세기 분포 즉, 상의 세기 정보는 화소(pixel)를 기본 단위로 표현되며 유한한 크기를 가지므로, 세기 정보에 관련된 진폭에 단순히 임의의 위상 값을 부가해서는 상의 정보를 정확히 복원해 낼 수 없다. IFTA는 반복 과정을 통해 각 화소의 최적 위상 값을 결정해 가는 방법으로, 파워 스펙트럼(power spectrum)을 완만하게 하여 급격한 세기 변화나 스펙클(speckle)의 영향을 억제할 수 있는 장점을 가진다. 그러나, 이 방법에서는 반복 계산과정을 수행하기 위해 초기에 어떤 위상 값을 선택하는가가 매우 중요하다. 만일 초기 위상 값을 적절히 선정하지 못한다면, global minimum으로 수렴하지 못하고 local minimum에 빠지는 문제를 안고 있다. 그러므로 이 방법의 핵심은 어떤 방법으로 적절한 초기 위상 값을 선정하여 반복 과정을 시작하는가에 달려 있다고 할 수 있다.

만일 주어진 밝기 정보 즉, 재생하고자 하는 영상의 2차원 세기 분포가 $I(x, y)$ 이면 그 진폭은 단순히 $|I(x, y)|^{1/2} = |u(x, y)|$

본 연구는 97년도 교육부 학술 연구조성비(BSRI-97-2429)에 의하여 연구되었음.

의 관계로 주어지며, 여기에 적절한 위상함 $\phi(x, y)$ 을 부가하여 복소 진폭을 결정하게 된다. 이렇게 주어지는 복소 진폭은

$$u(x, y) = |u(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \quad (1)$$

이며, 식(1)의 푸리에변환 식은

$$U(v, \mu) = \int \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y) \exp[i2\pi(vx + \mu y)] dx dy \quad (2)$$

이고, v 와 μ 는 푸리에영역의 공간 주파수 좌표이다. 식(1), (2)의 표현에서 보듯이 복소 진폭이나 푸리에변환 식이 무한 영역에 걸쳐 정의되며 연속적으로 분포한다면, 위상함 $\phi(x, y)$ 의 구체적인 값에 상관없이 재생 상의 세기 $I'(x, y)$ 는 정확히 $I(x, y)$ 와 일치하게 된다. 그러나, 주어진 영상이 유한한 크기를 가지며 화소 단위로 주어지므로, 위상함 $\phi(x, y)$ 이 적절히 주어지지 않는다면, 재생영상은 원래의 영상과 많은 차이를 보일 것이다. 상의 정확한 복원이나 CGH의 최적설계 과정에서 식(1)의 위상함을 자유변수(free parameter)라 하는데, CGH의 회절효율을 높이거나, 상의 재생 효율을 높이기 위해 $\phi(x, y)$ 는 최적화 되어야 한다.

IFTA은 그림 1의 흐름도와 같이 위상함을 최적화하기 위해, 푸리에변환(Fourier Transformation)과 역 푸리에변환(inverse Fourier Transformation)을 반복 수행하며 푸리에영역 제한(Fourier-domain constraints)과 공간영역 제한(space-domain constraints)을 순차적으로 적용한다. 먼저 목표 영상의 세기 $I(x, y)$ 에 제곱근을 취하여 진폭 $|u(x, y)|$ 를 구하고 여기에 위상함을 부가하여 초기 복소 진폭을 결정해야 한다. 물론, $I(x, y)$ 와 복소 진폭 $u(x, y)$ 는 등 간격으로 샘플링(sampling)되며, 샘플링 이론에 따라 $I(x, y)$ 의 샘플링 간격은 $\Delta x_i \geq 1/\Delta v_i$, $u(x, y)$ 의 샘플링 간격은 $\Delta x_u \geq 1/\Delta v_u$ 이어야 한다. 여기서 Δv_i 와 Δv_u 는 각각 세기와 복소 진폭의 band limit을 의미한다. 그러나 세기와 복소 진폭은 $|u(x, y)|^2 = I(x, y)$ 의 관계를 만족해

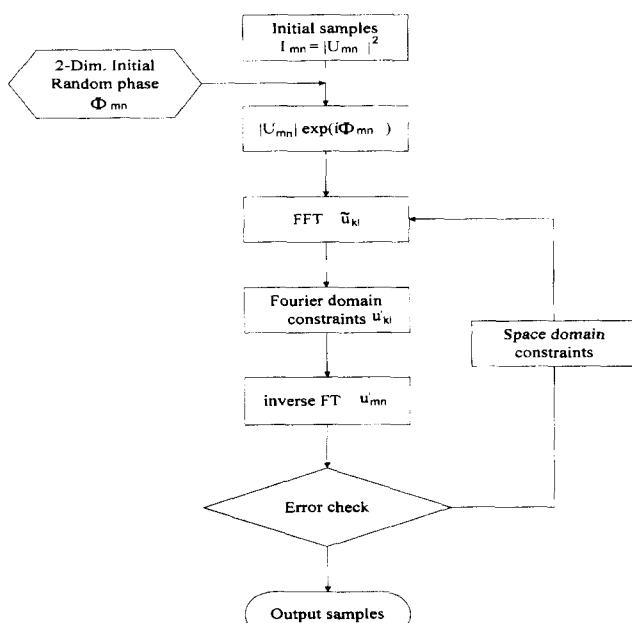


그림 1. Flow chart of iterative Fourier transform algorithm.

야 하며, 동시에 공간 영역에서 세기와 복소 진폭의 샘플링 간격이 일치해야 하므로, 세기와 복소 진폭의 band limit 간에는 $\Delta v_u = \Delta v_i/2$ 의 관계가 만족되어야 한다. 이로 인해 복소 진폭의 푸리에변환 결과에는 불필요한 높은 공간 주파수 항들이 존재하게 된다. 푸리에변환 후에 적용되는 푸리에영역 제한은 이러한 높은 주파수 항을 제거하는 작용과 스펙트럼의 급격한 변화를 평탄화하는 clipping 작용으로 구성된다. 만일 주어진 세기 정보로부터 결정된 복소 진폭의 샘플링 결과를 u_{mn} 이라 하고, 복소 진폭의 푸리에변환 결과를 \tilde{u}_{kl} 이라 한다면, 푸리에영역 제한에 의한 스펙트럼의 수정 결과 u'_{kl} 은

$$u'_{kl} = \begin{cases} 0 & \text{for } k \geq p/2 \text{ or } l \geq q/2 \\ \tilde{u}_{kl} & \text{if } k < p/2 \text{ and } l < q/2 \\ \tilde{u}_{max} \exp(i\tilde{\phi}_{kl}) & \text{if } |\tilde{u}_{kl}| > \tilde{u}_{max} \end{cases}$$

단, $(k, l = 0, 0; \dots; p-1, q-1)$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 \tilde{u}_{max} 는 스펙트럼의 최대허용 진폭으로 clipping level을 의미하며, k, l 은 푸리에영역에서의 샘플링된 공간주파수 좌표이고, $p/2, q/2$ 는 각각 푸리에영역에서 허용 가능한 최대 공간 주파수 값을 의미한다. 식(3)의 푸리에영역 제한을 적용한 다음, u'_{kl} 에 IFT를 취하여 복원 영상의 복소 진폭 u'_{mn} 을 구하게 되는데, 아래의 관계식에 따라 주어진 영상과 복원된 영상간의 복원 효율에 관한 오차를 구한다.

$$e = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m,n=0}^{M,N-1} (|u_{mn}| - |u'_{mn}|)^2} \quad (4)$$

여기서 m, n 은 공간영역에서 샘플링한 공간좌표이며 M, N 은 m, n 의 최대 값을 의미한다. 계산된 오차가 오차 허용치보다 크면, u'_{mn} 에 공간영역 제한을 적용한 후 다시 푸리에변환 등을 반복적으로 수행하여 오차 허용치 이하가 되거나, 일정한 반복 횟수가 될 때까지 최적화를 계속한다. 공간영역 제한은 오차가 적은 재생 영상을 얻기 위하여 재생 영상의 진폭 $|u'_{mn}|$ 을 원래의 진폭 $|u_{mn}|$ 으로 바꿔주는 역할을 한다. 이상과 같이 푸리에영역 제한과 공간영역 제한을 반복적으로 적용함으로써 최적 위상을 결정할 수 있으며, 결정된 위상은 CGH 또는 CGWH(Computer Generated Waveguide Hologram)의 최적 설계에 활용될 수 있다.^[4, 15]

이와 같은 과정을 따라 위상함을 최적화 할 때 초기 위상 값의 적절한 선택이 매우 중요함을 이미 언급한 바가 있다. 예로서, 난수 발생과정(random number generation)을 통해 선정된 $-\pi \sim \pi$ 구간의 무작위 값(random value)을 2차원 초기 위상으로 사용한다면, 반복 과정에서 인접한 화소 사이에 π 만큼의 위상 차이가 발생하게 되는데 이로 인해 재생 영상에 어두운 점들이 형성된다.^[4] 1차원 문제에서는 인접한 화소 사이의 π 의 위상 차이를 수정해 줌으로써 어두운 점을 없앨 수 있지만, 2차원 문제에서는 특정 화소에 관련된 π 의 위상 차이를 수정하면, 인접한 다른 화소로 동일한 문제가 옮겨가게 되므로, 발생된 π 만큼의 위상 차이를 전체적으로 수정하는 것



그림 2. (a) Target image, (b) The image reconstructed by IFTA with a simple 2-dim, initial random phase.

은 불가능하다. 그럼 2는 목표영상 (a)와 단순히 2차원 무작위 위상 값을 초기 위상으로 사용하였을 때의 재생영상 (b)를 비교한 것이다. 재생 영상의 경우 π 의 위상 차이로 인한 검은 점들을 관찰할 수 있는데, 이를 stagnation이라 한다. 그러므로 초기 위상 값을 적절히 선정하지 못하면, 아무리 최적화 과정을 반복하더라도 최적 위상 값을 찾을 수 없게 되며, 정확한 상의 복원을 기대할 수 없게 된다.

최근 Wyrowski와 Bryngdahl 등은 1차원 문제에서는 인접한 화소간의 π 의 위상 차이를 완벽하게 수정할 수 있다는 점에 착안하여 stagnation을 해결하는 방법 즉, 적절한 2차원 초기 위상 값의 선정 방법을 제안하였다.^[4] 이 방법에서는 먼저 $-\pi \sim \pi$ 의 난수 발생을 통해 1차원 초기 위상 값을 무작위로 선정하여 진폭을 1로 하는 복소 진폭을 결정한 다음, 1차원 IFTA를 적용하여 위상항 ϕ_m 을 최적화 하였다. 그런 다음, 최적화된 1차원 위상 값을

$$\phi_{mn} = \phi_m + \phi_n \quad (5)$$

와 같은 방법으로 2차원으로 확장하여 2차원 IFTA의 초기 위상으로 사용하였다. 그러나, 이러한 방법을 통해 stagnation 문제는 어느 정도 해결될 수 있었지만, 수렴 속도가 느리며, 특히 수렴의 안정성 문제가 해결되지 못하였다.^[4] 그러므로 다음 절에서는 수렴 속도 및 수렴의 안정성 해결에 초점을 맞춰 더욱 최적화된 초기 위상 값을 얻기 위한 방법을 제안한다.

2.2. 수정된 IFTA

본 논문에서 제안하는 초기 위상의 결정 방법을 설명하기 위하여 1차원 초기 위상 값을 결정하는 기준 과정을 보다 자세히 살펴보자. 그림 3은 초기 위상을 최적화하는 기준 방법의 흐름도이다. 먼저 난수 발생을 통해 $-\pi \sim \pi$ 범위의 1차원 위상 값 ϕ_m 을 무작위로 발생시켜 진폭을 1로 하는 복소 진폭을 구한다. 최적의 1차원 위상항을 얻기 위하여 1차원 푸리에 변환을 적용하고, 앞에서와 마찬가지로 푸리에영역 제한과 역 푸리에변환을 적용한다. 오차를 평가한 다음 공간영역 제한을 적용하고, 인접한 화소간의 π 의 위상 차이를 수정하여 오차 허용치 이하가 될 때까지 1차원 IFTA 과정을 반복한다.

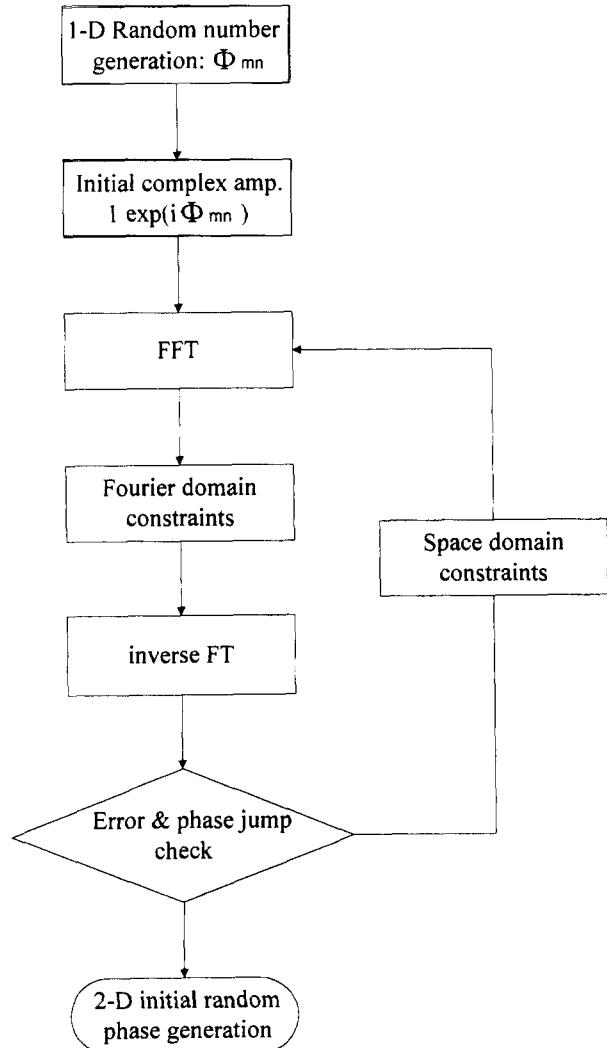


그림 3. Flow chart of 1-dim. IFTA for obtaining a 1-dim. initial phase distribution.

이런 식으로 최적화된 1차원 위상은 세기가 일정한 1차원 영상에 대한 최적 위상과 같다. 물론 2차원 IFTA를 위한 2차원

초기 위상은 식 (5)를 이용하여 최적화된 1차원 초기 위상으로부터 결정된다.

그러나, 본 논문에서 제안하는 방법은 1차원 초기 위상을 최적화하기 위한 과정 중에서 위상 값들 중 하나를 인위적으로 변화시켜 좀 더 적절한 1차원 초기 위상을 구하고 하는 것이다. 기존 방법과 달리 1차원 IFTA로 1차원 초기 위상을 최적화 하는 도중에, 한 화소의 위상 값을 인위적으로 변화시킨 후 다시 1차원 IFTA를 적용하고 또 동일한 화소의 위상 값을 변화시키는 과정을 반복한다. 여기서 인위적으로 변화된 위상은 다른 화소의 위상 값에 비하여 이미 최적 조건이라고 여겨졌던 분포로부터 멀어지게 되므로, 1차원 초기 위상의 최적화에 관련된 오차는 일시적으로 증가한다. 그러나, 증가된 오차는 또 다시 1차원 IFTA를 적용함으로서 다시 오차 허용치로 감소하게 되는데, 이 과정에서 인위적으로 변화시켰던 화소의 위상 값도 최적값으로 수렴하겠지만, 변화를 주지 않았던 다른 화소의 위상 값들도 반복과정에 의하여 이전보다 더욱 최적의 조건에 근접하게 될 것이다. 물론, 1차원 초기 위상의 최적화에 관한 오차 허용치는 동일하게 설정되어 있으므로 인위적으로 변화된 화소의 위상 값은 다른 화소의 위상 값에 비해 최적 조건에서 멀어진 형태를 유지할 것이다. 따라서 이러한 일련의 과정을 통해서 특정 화소를 제외하면, 전체적인 1차원 초기 위상 값들이 좀 더 이상적인 값을 갖게 된다. 앞에서 언급한 오차의 일시적인 증가는 1차원 초기 위상의 최적화 과정에서 일어나는 것이므로, 2차원 IFTA의 오차와는 무관하다.

그림 4는 1차원 최적 위상을 결정하기 위한 기존 방법과 제안된 방법의 결과를 비교한 것이다. 만일 일정한 세기를 갖는 1차원 영상이 완벽하게 복원된다면, 각 화소의 세기는 모두 1이라는 값을 가지게 되므로, 그 화소별 세기의 분포는 1이 중심인 delta 함수 형태가 될 것이다. 두 가지 방법에서 오차 허용치를 동일하게 설정하였으므로, 두 분포도는 동일한 표준편차를 갖게 된다. 하지만 기존 방법의 경우 각 화소의 세기가 1을 중심으로 정규 분포를 이루는 반면, 제안된 방법에서는 1에 근접한 화소의 수가 기존 방법에 비해 더 많으며 동시에 표준편차가 동일하므로 1로부터 많이 벗어난 화소들도

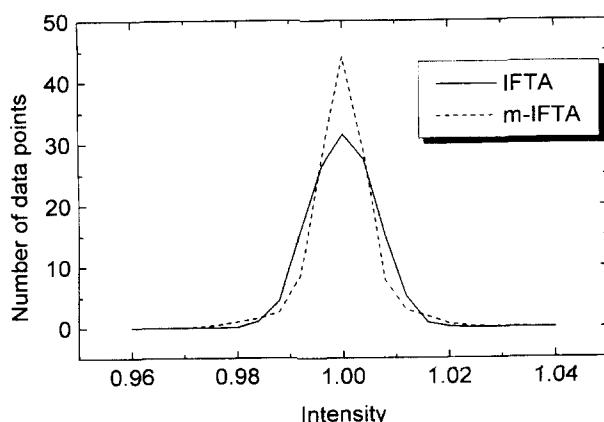


그림 4. 1-dim. intensity distributions determined by the conventional IFTA and the modified IFTA.

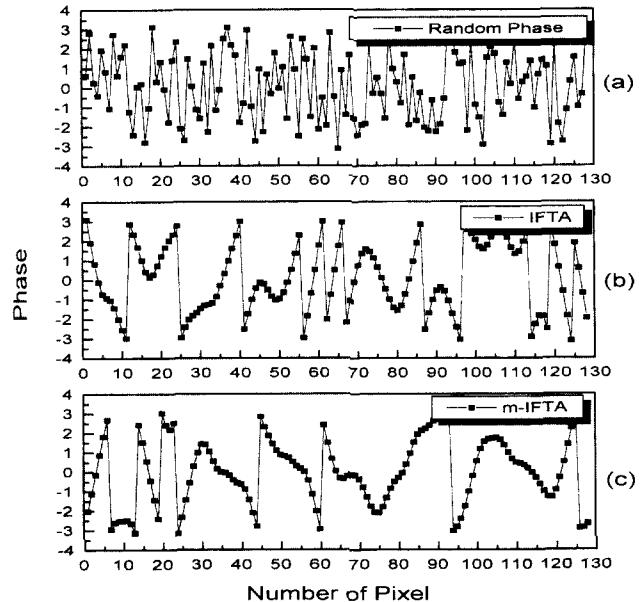


그림 5. 1-dim. phase distribution generated by random number generator (a), and phase distributions optimized by the conventional method (b), and the modified method (c).

일부 존재함을 볼 수 있다. 이러한 경향은 각 분포도의 반치 폭과 1에 근접한 화소의 수를 비교해 봄으로써 명확해 진다. 다음 장의 결과로부터 기존 방법으로 최적화된 초기 위상 값을 사용할 때보다, 수정된 방법으로 최적화된 1차원 초기 위상을 사용하게 되면 2차원 영상의 복원 효율이 개선됨을 알 수 있다. 그럼 4에서처럼 제안된 방법으로 인해 분포도가 달라지는 것이 개선의 한 요인으로 판단되며, 1차원 위상의 최적화 과정에서 특정 화소의 값을 인위적으로 변화시킴으로서 local minimum에 빠지는 경향을 감소시킨 것으로도 이해된다. 또한, 기존 방법에 비해 1차원 위상의 최적화 과정 중에 1차원 IFTA가 더 많이 반복되기 때문에, 푸리에영역 제한의 하나인 스펙트럼의 평탄화가 더 많이 진행되어 수렴속도의 개선에 영향을 준 것으로도 판단된다.

기존 방법과 수정된 방법에 의해 최적화된 1차원 위상의 분포 형태는 최적화를 위해 사용된 무작위 위상 값(예를 들어 그림 5(a))에 따라 크게 달라지므로, 이로부터 어떤 결론을 유추하기 어렵지만, 비교를 위해 그림 5에 그 결과를 예시하였다. 그림에서 (a)는 난수 발생을 통해 얻어진 1차원 무작위 위상값이며, (b)와 (c)는 각각 기존 방법과 수정된 방법으로 최적화된 1차원 위상 값이다.

III. 영상 복원 결과 및 논의

모의 실험에서는 크기가 128×128 화소이고, gray level이 256인 인물 영상을 사용하여 기존 방법과 수정된 방법의 적용 결과를 비교하였다. 이때 1차원 IFTA의 적용 과정에서 오차 허용치는 0.003이며, 2차원 IFTA에 의한 최적화의 반복 횟수는 500회로 제한하였다. 물론 난수 발생에 따라 실험 결과가 조금씩 달라질 수 있으므로 동일한 조건으로 모의 실험을

20회 정도 수행하였다.

그림 6(a)는 기존 방법을 이용한 모의실험을 20회 수행하여

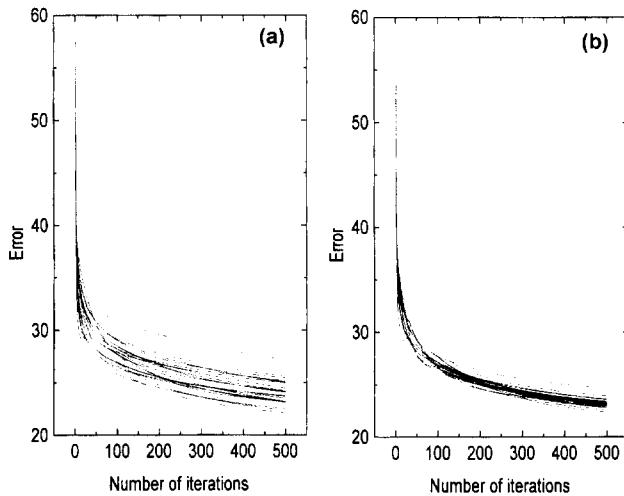


그림 6. Convergence of error according to number of iteration
(a) IFTA and (b) modified IFTA.

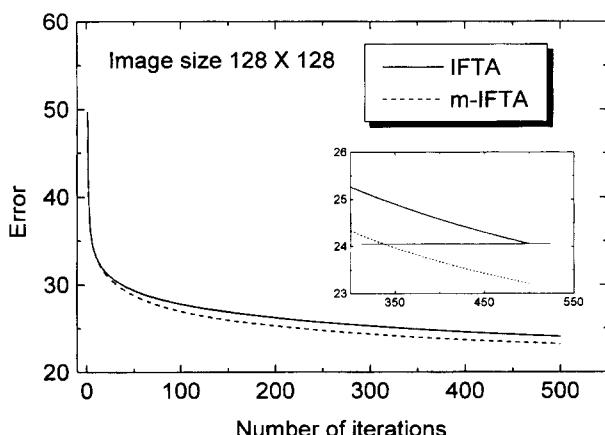


그림 7. The comparison between mean values of convergence error of the IFTA and the modified IFTA.

얻은 결과로서 반복 횟수에 따른 오차의 감소를 중첩시켜 나타낸 그래프이고, 그림 6(b)는 수정된 IFTA를 적용하여 모의실험을 수행하였을 때 반복 횟수에 따른 오차의 감소를 나타낸 그래프이다. 기존 방법의 경우 그림 6(a)에서처럼 모의실험에 따라서 오차의 수렴 경향이 크게 달라짐을 볼 수 있다. 반면에, 그림 6(b)에서는 오차의 수렴 경향이 거의 유사하며, 최종 오차 값도 모의 실험에 따라 크게 달라지지 않음을 볼 수 있다. 두 그래프의 평균값을 취해 보면 두 알고리듬의 차이를 더욱 뚜렷이 알 수 있다. 그림 7은 각각의 알고리듬에 대하여 그림 6의 (a)와 (b)의 평균을 구하여 그린 그림이다. 그림에서 실선이 기존 방법에 의한 평균 오차의 수렴을 나타내고, 점선으로 나타낸 것이 수정된 방법에 의한 평균 오차의 감소를 나타낸 것이다. 수정된 알고리듬의 경우 오차가 더욱 빠르게 수렴하며, 더 작은 오차로 수렴함을 알 수 있다. 기존 방법을 500회 반복했을 때 갖는 수렴 오차의 평균값과 같은 값을 갖는 수정된 알고리듬의 반복 횟수는 약 350회 부근으로, 이것은 수정된 알고리듬이 평균적으로 약 150회 즉, 30% 정도의 반복 횟수가 적은 것을 나타내고 있다. 따라서 영상의 크기가 더욱 클수록 계산시간을 단축할 수 있다.

한편, 수정된 방법으로 1차원 초기 위상을 최적화 할 때 한 화소의 위상 값을 $\pi/2$ 만큼 인위적으로 변화시켰는데, 위상 값을 다르게 변화시켜도 모의실험 결과는 마찬가지임을 알 수 있었으며, 어떤 화소의 위상 값을 변화시키는 가도 결과에 영향을 미치지 않았다. 또한 그림 8은 두 방법에 의해 재생된 영상을 비교한 것으로, 기존 방법에 의한 그림 8(a)에 비해 수정된 방법에 의한 그림 8(b)에서 인물상의 턱과 눈 부분이 좀 더 개선되었음을 볼 수 있었다. 두 영상의 최종적인 오차 평균을 비교하여 보면 개선된 알고리듬에 의한 영상의 수렴오차가 0.84 정도 더 적은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

기존 IFTA에서 1차원 위상의 최적화가 2차원의 반복계산 과정에서 재생영상에 많은 영향을 미치는 점에 착안하여 1차

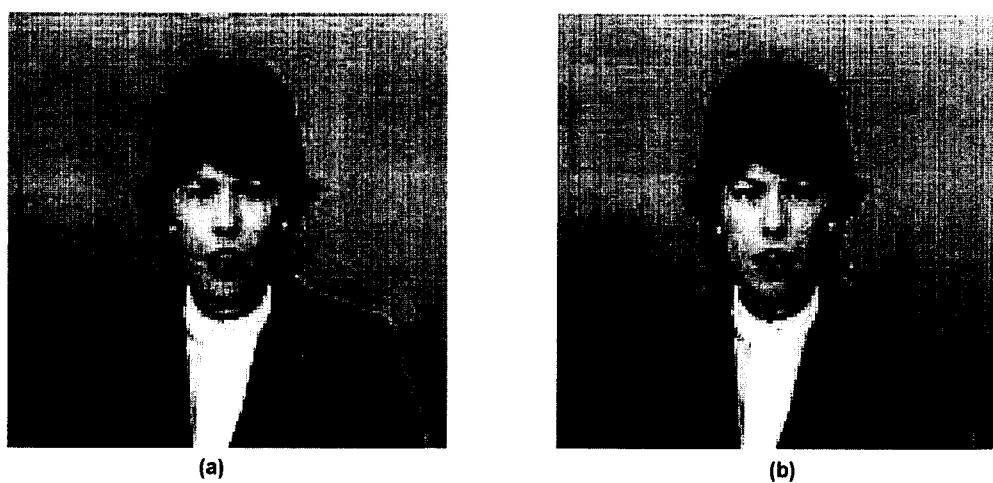


그림 8. Two images reconstructed by using the (a) conventional IFTA and (b) modified IFTA.

원 위상을 기준 방법보다 더 최적화할 수 있는 수정된 IFTA을 제안하였다. 그리고 두 알고리듬의 이론적 차이점과 각각의 모의실험 결과를 비교하였다. 모의실험 결과로부터 수정된 알고리듬의 경우 최종적으로 수렴하는 오차의 편차가 줄어들고, 빠르게 수렴하며, 수렴하는 오차의 값도 줄어드는 것을 확인하였다. 상의 크기가 128×128 화소이고 gray level이 256인 경우 전체적으로 30% 정도 반복횟수를 줄일 수 있었다. 그리고 복원된 영상도 기존 알고리듬을 적용한 것보다 더욱 선명한 것을 확인하였다. 또한 위상의 최적화 과정에서 목표 영상의 크기가 클수록 많은 계산 시간이 요구되는데, 제안한 알고리듬의 경우 비록 1차원 초기 위상의 결정과정이 다소 길어지지만, 2차원 과정의 계산 시간은 오차의 수렴속도가 빨라지므로 전체적으로 계산 시간이 감소하게 된다. IFTA를 적용하여 구현할 수 있는 CGH는 그 기록 정보가 진폭과 위상에 관한 것이고, 이러한 정보는 모두 연속적인 값들로 이루어져 있다. 이러한 CGH를 구현하는 방법으로는 grating array를 이용하면 위상과 진폭을 동시에 기록할 수 있다.^[15] 그리고 일반적인 CGH는 기록하는 정보가 모두 양자화 되어 있다. 따라서 수정된 방법을 양자화 된 경우에 대하여도 적용하기 위하여 연구를 진행하고 있다.

참고문헌

- [1] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, Optik **35**, 237-246 (1972).

- [2] H. V. Deighton, M. S. Scivier, and M. A. Fiddy, Opt. Lett. **10**, 250-251 (1985).
- [3] J. R. Fienup and C. C. Wackerman, J. Opt. Soc. Am. A **3**, 1897-1907 (1986).
- [4] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, J. Opt. Soc. Am. A **6**, 1058-1065 (1988).
- [5] Michael A. Seldowitz, Jan P. Allebach and Donald W. Sweeney, Appl. Opt. **26**, 2788-2798 (1987).
- [6] M. S. KIm, M. R. Feldman and C. C. Guest, Opt. Lett. **14**, 545-547 (1989).
- [7] 김철수, 김동호, 김정우, 배장근, 이재곤, 김수중, 전자공학회논문지 제 32권 A편 111-119, (1995).
- [8] Frank Wyrowski, Appl. Opt. **28**, 3864-3870 (1989).
- [9] Bruno Fracasso, No Ile Nochez, Matthieu Desmons and Faouzi Ghorbel, Optics Comm. 355-364 (1997).
- [10] Brian K. Jennison and Jan P. Allebach, J. Opt. Soc. Am. A **8**, 652-657 (1991).
- [11] L. Legeard, Philippe Refregier, and Pi rr Ambs, Appl. Opt. **36**, 7444-7449 (1997).
- [12] J. R. Fienup, Opt. Eng. **19**, 297-305 (1980).
- [13] Wissam A. Rabadi, Harley R. Myler and Arthur R. Weeks, Opt Eng. **35**, 1015-1024 (1996).
- [14] L. Legeard, Philippe Refregier, and Pi rr Ambs, Appl. Opt. **36**, 7444-7449 (1997).
- [15] Ming Li, Jorgen Bengtsson, Mats Hagberg and Anders Larsson IEEE Journal of selected topics in QE. **2**, 226-235 (1996).

Improvement of iterative fourier transform algorithm

Jae Wan Jeong and Seung Gol Lee

Department of Electronic Materials and Devices Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

(Received May 22, 1998, Revised manuscript received October 21, 1998)

Iterative Fourier transform algorithm (IFTA) was utilized for the phase retrieval problem or the optimal design of Computer-generated hologram (CGH). In the iteration process for determination of optimal phase, efficiency of the IFTA depends strongly on the selection of initial phase value. In this paper, we proposed the modified iterative Fourier transform algorithm in order to improve the convergence speed of error and the stability of convergence. The modified IFTA was reduced number of iteration about 30% than existing IFTA with the image size of 128×128 pixel.