

디지털 홀로그램 (CGH) 생성 기술

강훈중, 민병기*, 홍성희, 김영민

전자부품연구원, *(주)아스텔

요약

본고에서는 수학적 모델을 기반으로 디지털 홀로그램 생성하는 기술에 대해 기술한다. 디지털 홀로그램 생성은 먼저 스칼라 회절에 대한 수학적 모델을 이용하여 생성이 가능하며, 위상 분포를 갖는 디지털 홀로그램 생성 또한 다양한 방법에 의해 실현이 가능하다. 디지털 홀로그램 생성 분야에서 주요 이슈 중에 하나는 높은 계산복잡도를 갖는 디지털 홀로그램 생성을 가속화하는 방법이다. 본고에서는 이와 같이 디지털 홀로그램 생성에 관한 기본 방법 및 가속화 방법 등을 나타낸다.

I. 서론

기존의 사진 카메라 및 비디오 카메라는 빛을 기록하는 장치로 볼 수 있다. 하지만, 이를 이용하여서는 위에서 언급한 바와 같이 빛의 모든 물리적 특성 및 빛의 파면을 기록할 수는 없다. 좀 더 구체적으로써, 광 감응 장치에 의해 빛의 강도 분포를 기록한다. 이에 반해, 사물로부터 난반사된 빛의 파면을 완벽하게 기록하기 위해서는 먼저 입사되는 빛의 방향 성분을 비롯한 모든 물리적인 특성들이 기록되어야 한다. 이상적인 관점에서 볼 때, 반사된 빛의 광 필드 분포 (light field distribution)가 기록되어야 한다.

기하광학은 비록 완벽하지는 않지만, 광 필드 분포를 표현할 수 있는 간단한 모델이라고 볼 수 있다. 따라서 제한된 경우에 적합한 광학적 모델로써 활용되어질 수 있다. 만일 이러한 광 필드 분포가 기록 되어질 수 있다면, 광 필드 분포를 손실 및 왜곡 없이 재생할 수 있는 물리적 장치가 필요하게 된다. 광 필드 분포를 기록 및 재생할 수 있는 프로토타입이 여러 문헌에 의해 발표되었다 [1].

Integral imaging은 기하광학에 기반한 light field imaging 방법이다. 하지만, 이러한 방법은 여러 제한으로 인해, 완벽하게 light field distribution을 기록 및 재생할 수 있는 방법

이라고 할 수 없다. 기하광학보다 좀 더 정확한 모델링이 가능한 광학 모델은 파동광학이다. 공간상에 전파되는 빛의 특성을 scalar wave field에 의해 모델링을 하는 것이다. 원하는 3차원 객체에 대한 광학 정보는 wave field에 의해 전파되기 때문에, 공간상에 전파되는 빛은 scalar wave field에 의해 표현이 가능하다. 이러한 wave field는 기록 및 재생이 가능하기 때문에, 원하는 3차원 객체에 대한 시각적 복원 및 재생이 가능하다. 홀로그래피는 이러한 것이 가능한 대표적인 기술이다 [2]. 3D imaging 또는 디스플레이를 목적으로 응용 시스템의 경우, 이러한 scalar wave model에 의해 광파에 대한 정확한 표현 및 처리가 가능하다.

따라서, 홀로그래피는 optical wave field를 기록 및 재생할 수 있는 기술로 여겨질 수 있다. 좀더 구체적으로, 홀로그래피는 3차원 객체로부터 난반사된 물체빔과 기록 및 재생에 활용되는 참조빔간의 간섭 및 회절을 기반으로 3차원 객체에 대한 정보 기록 및 재생을 하는 방법으로써, 다양한 광학 응용분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 실제로, 홀로그래피 또는 홀로그램이라는 용어는 물리적으로 3차원 객체를 광파에 의해 복원하는 모든 방법에 대해서도 사용되어지고 있다. 본 고에서는 이와 같은 홀로그램을 홀로그래픽 디스플레이를 비롯한 홀로그래픽 프린터 등의 디지털 홀로그래피 응용 분야에 활용하기 될 수 있는 디지털 홀로그램 생성 기술에 관해 나타낸다.

II. 디지털 홀로그램 생성

홀로그램은 물체로부터 반사된 물체파와 일정 방향으로 입사시켜주는 참조파와의 상호 간섭에 의해 형성되며, 이때 두 개의 파가 간섭된 것을 홀로그래픽 간섭패턴이라고 한다. 이를 CCD 등의 카메라에 의해 획득 또는 수치적 방법에 의해 생성된 간섭패턴을 디지털 홀로그램이라고 하며, 수치적 방법에 의해 생성하는 과정을 디지털 홀로그램 생성이라고 한다. 대표적인 디지털 홀로그램 생성 방법은 Rayleigh-Sommerfeld (R-S) 적분

이며, Fresnel hologram과 Fourier hologram 등은 이를 이용한 approximation 들이다. 디지털 홀로그램을 생성할 때 가상의 3차원 객체는 동일한 angular intensity distribution의 특성을 갖는 자체 발광 포인트의 집합체로 간주되며, 이를 point-cloud로 불린다.

1. Rayleigh-Sommerfeld Integral

R-S 적분을 이용한 방법으로써, 홀로그램은 $\xi-\eta$ 평면에 위치하며, p 번째 점 위치는 좌표값 $a_p(x_p, y_p, z_p)$ 이다. 각각의 점들은 실수 값인 진폭 a_p 와 relative phase ϕ_p 를 갖는다. 복소 진폭 분포를 갖는 홀로그램 $O(\xi, \eta)$ 는 물체 포인트 수의 N 에 따른 파동 중첩에 의해 결정된다.

$$O(\xi, \eta) = \sum_{p=1}^N \frac{a_p}{r_p} \exp\{j(kr_p + \phi_p)\}$$

이 파장의 역수(파수) k 는 $k = 2\pi/\lambda$ 로 정의되어지며, 여기에서 λ 는 자유공간파장이다.

홀로그램 위의 물체 점 p 번째 포인트와 홀로그램 평면에서의 위치 (ξ, η) 간의 사이 거리 r_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_p = \sqrt{(\xi - x_p)^2 + (\eta - y_p)^2 + z_p^2}$$

만약, 참조파가 평행하게 진행한다면, 복소진폭 분포를 갖는 참조파 $R(\xi, \eta)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$R(\xi, \eta) = a_R \exp\{-jk(\xi \sin \theta_\xi + \eta \sin \theta_\eta)\}$$

여기에서, a_R 는 복소진폭이며, θ_ξ 는 ξ 축의 참조파의 입사각이다. 그리고 θ_η 는 η 축의 참조파의 입사각이다.

홀로그램 평면 위의 모든 복소진폭 분포는 물체파와 참조파의 간섭에 의해 형성되며, $O(\xi, \eta) + R(\xi, \eta)$ 로 나타내진다. 전체 강도 패턴은 홀로그램의 실제 물체의 빛의 분포이다.

$$I(\xi, \eta) = |O + R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + R^*O + RO^*$$

여기서 R^* 와 O^* 는 각각 R , O 의 복소켤레를 표시한다. 위 식의 우변은 4개의 항으로 되어 있지만, 처음의 2항은 물체파 및 참조파의 강도 분포로 거의 일정한 값이 된다. 뒤의 2항은 홀로그램으로서의 간섭 정보를 가지고 있어, 컴퓨터로 간섭 패턴을 계산할 때에는 이 2항만을 계산하는 쪽이 효율적이다. 이 2항만을 선택하여 변형하면 다음과 같이 된다.

$$I(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{r_i} \exp(kr_i + k\xi \sin \theta_\xi + k\eta \sin \theta_\eta)$$

단, 참조파는 물체파와의 각도 θ_ξ, θ_η 로 입사하는 평면파라고 가정한다. 위 식에서는 간섭 패턴 $I(\xi, \eta)$ 가 양과 음의 값을 갖기 때문에, 화상으로서 출력하는 경우에는 값을 이동하여 항상 양의 값을 취하도록 한다.

2. Fourier 홀로그램

또 다른 근사법으로서 Fourier 변환에 의한 방법이 있다. 피사체가 홀로그램과 평행한 면내에 존재하고, 홀로그램으로부터 충분히 분리되어 있는 경우에는 홀로그램 상에서 물체파의 복소진폭은 피사체의 광 진폭 분포의 Fourier 변환으로서 구해진다. 충분히 떨어져 있다고 생각되는 조건은 수백 m 이상이 되는 것도 있지만, 렌즈를 이용하여 초점거리 f 의 간격에 물체나 홀로그램을 배치하면, 홀로그램의 기록 및 재생이 가능하다. Fourier 변환에 의해 구해진 물체파에 임의의 참조파 성분을 더해 홀로그램을 계산한다. 2차원 영상을 입력으로 한 경우, 영상의 진폭은 양의 값만을 취하기 때문에 그대로 Fourier 변환을 하면 큰 직류분이 Fourier 스펙트럼의 중심에 나타나 주변의 홀로그램 정보의 다이내믹 레인지를 낮추고 만다. 이 때문에 일반적으로 영상의 진폭 값에 랜덤으로 +1 혹은 -1을 곱하는 방법을 이용하여 영상에 랜덤 위상을 부가한다. Fourier 변환을 이용하는 경우 피사체는 2차원 영상이다. 3차원 영상을 표시하기 위해서는 물체를 깊이 방향의 다수의 단층면에서 표시하거나, 홀로그램을 다수의 요소로 분할하여 홀로그래픽 스테레오그램(holographic stereogram) 기술을 적용하는 방법이 가능하다.

III. 위상 전용 디지털 홀로그램 생성

화소로 구성된 위상 전용 공간 광변조기의 완벽하지 못한 변조 특성으로 인해 홀로그램 최적화 또는 홀로그램 코딩이 복원 영상의 화질을 향상시키는 최선의 방법일 수 있다. 이때 화질을 예측할 수 있는 방법으로써 강도 분포, 회절 효율, 복원 영상의 오류 및 신호대잡음비 등이 사용될 수 있으며 적합한 결과 측정을 위해서는 여러 방법들을 병합하여 이용하는 것이 적합할 수 있다[3]. 일반적으로 디지털 홀로그램 생성을 위한 최적화 방법은 다음과 같이 세 부분으로 분류될 수 있다. (i) Iterative transform algorithms (e.g. Gerchberg-Saxton algorithm (IFTA), Input-Output algorithm) [4,5,6] (ii) Direct search based methods (e.g. simulated annealing) [7,8,9] (iii) Geometry-based methods (e.g. finite mesh adaption) [10]

1. 위상 전용 디지털 홀로그래프 최적화 방법

Gerchberg-Saxton algorithm (iterative Fourier transform algorithm - IFTA)은 일반적으로 여러 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 그것은 소요된 연산 시간에 비해 정확도가 높은 홀로그래프 연산이 가능하며, 응용 시스템에 따라 구현 및 확장이 쉽기 때문이다[4][5]. 그 외에도 Fresnel approximation 등의 활용도도 높아지고 있다. 일반적인 IFTA와 비교하여 Fienup 알고리즘[6]은 안정적이지는 않지만, 복원 영상의 진폭의 피드백에 의해 빠른 속도로 수렴되는 장점이 있다.

일반적으로 2차원 공간 광변조기로서, LCD 또는 LCoS등을 이용하며, 이는 최소 6비트 이상의 양자화된 데이터를 사용하기 때문에 알고리즘에서의 양자화 과정을 필요로 한다 [8][11]. 기본 알고리즘의 3차원 확장 방법에 의해 전체 복원 영역에 대해 처리가 가능하다 [12~16]. 좀 더 향상된 화질의 복원영상은 direct binary search [7][8][9][17][18], threshold accepting [19], 또는 simulated annealing[18~22]과 같은 direct search method 기반의 최적화 알고리즘을 통해 얻을 수 있다. 이러한 방법들의 접근 방법은 다양한 변수들로 인한 비선형 문제들을 기존의 최적화 알고리즘에 의해 해결함으로써 명확한 최적의 알고리즘을 찾는 것이다. 대표적인 방법으로써 전역 최적화 방법을 이용하여 지역 수렴에 의한 정체를 해결하는 것이며, 이로 인해 상당한 연산 시간을 필요로 하지만 최종적으로 최적화된 결과를 얻을 수 있다. 만일 어떠한 조건에서 적합한 화질을 필요로 한다면, simulated annealing 또는 direct binary search와 같은 direct search 방법을 이용하여 적합한 연산 시간 안에 좋은 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 홀로그래프 생성의 최적화를 위해 초기 값으로 랜덤 위상 분포를 이용한다. 이러한 랜덤 분포를 이용하는 것은 IFTA를 위한 초기 값으로 이용함으로써 빠른 수렴으로 인한 연산 시간의 이득이 발생할 수 있으며, direct search 방법을 이용한 최적화 알고리즘에서도 지역 수렴의 문제점을 최소화할 수 있는 방법으로써, 랜덤분포를 초기값을 이용함으로써 효율 및 화질을 향상시킬 수 있다.

Genetic 알고리즘과 같은 좀 더 완벽한 direct search 방법들을 이용해 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 응용시스템에 포함되는 많은 변수들이면서 최적화가 되어야 한다. 실시간 홀로그래프 디스플레이를 위한 디지털 홀로그래프 연산의 가속화는 전용 하드웨어를 이용하여 가능하다. 일반적인 전용 하드웨어는 FPGAs [23~25], multi-core signal processors [26], 또는 멀티코어가 포함된 그래픽 카드를 [27~30] 이용해서 구현을 하며 이러한 연구 결과들이 다수 발표되었다. 또 다

른 가속화 방법으로써 홀로그래프는 선형 함수이기 때문에 다수의 독립된 홀로그래프를 병렬로 생성 후 다중화 하는 방법에 의해 가능하며, Montes-Usategui et al. [31] 및 Belloni [32]에 의해 발표되었다.

2. 복원영상의 화질 평가

복원 영상의 화질 평가는 2차원 영상의 경우와 비교해 쉽지 않다. 홀로그래프에 포함된 위상 특이성은 스펙클 노이즈를 야기한다. 이러한 스펙클 노이즈는 효과적인 해상도를 감소시키며, 복원 영상의 주관적 화질 열화에도 영향을 미친다. 이를 감소시키는 대표적인 방법인 시간 평균화 방법은 아날로그 기반의 홀로그래피 및 SLM을 이용하는 디지털 홀로그래피에서도 주로 사용된다[33][34]. 가시광선 내에서 발생하는 스펙클 노이즈를 감소시키는 가장 쉬운 방법은 초기 위상 분포를 달리하여 생성된 다수의 홀로그래프를 고속으로 재생하는 방법이다. 이러한 방법은 다수의 스펙클 노이즈를 중첩시킴으로써 평균적으로 노이즈를 감소시키는 방법이다. 이러한 방법은 아날로그 홀로그래피에서도 사용되고 있다[35]. 또한 zero-padding을 이용하는 IFTA 방법을 통해 증가되는 연산 시간문제는 있지만, 다른 방법에 비해 스펙클 노이즈가 상당히 감소된 결과를 얻을 수 있다 [36]. 또한 초기 위상 분포를 이용함으로써 향상된 화질을 얻을 수 있다. 또 다른 방법으로써 반복 연산 동안 발생할 수 있는 국소침체(local stagnation) 현상을 개선할 수 있는 방법들이 발표되었다[37][38].

IV. 디지털 홀로그래프 생성의 가속화

1. FPGA 기반 가속화

일본 치바대학의 Tomoyoshi 연구실에서 Field programmable gate array (FPGA)를 이용한 디지털 홀로그래프 생성기 HORN (HOlographic ReconstructioN)를 1992년부터 개발을 진행했다 [39-45]. 1993년 첫 번째 모델인 HORN-1을 1993년에 개발했으며, 300Mflops의 연산 성능을 가졌다. 단일 카드로 최근 버전은 HORN-6 (Fig. 11)로써 2008년에 개발되었으며, 이 모델은 4개의 고성능 FPGA가 내장되어 있다. 연산 성능 및 효율을 극대화하기 위해 Look-up 테이블을 이용한 근사화 된 Fresnel 알고리즘을 HORN-6의 커널로 이용하였다. 그 결과, 10,000포인트로 구성된 3차원 객체에 대한 디지털 홀로그래프를 실시간으로 생성할 수 있었다. 또한 광학 및 시뮬레이션에 의한 복원 영상을 <그림 2>에 나타내었다.

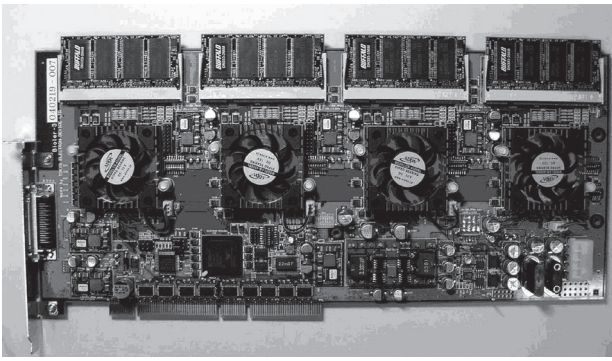


그림 1. 위에서 내려다 본 HORN-6보드 [41]

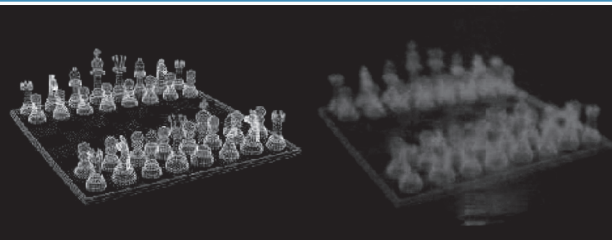


그림 2. 체스 보드의 수치적 복원 영상 및 광학적 복원 영상 (44,647 points) [41]

2. 이미지 홀로그램

이미지 홀로그램은 렌즈를 이용하여 기록하고자 하는 객체의 상을 홀로그램 평면에 위치하도록 하여 기록하는 방법이다 [46-48]. 이러한 방법에 의해 객체의 상을 홀로그램 평면에 프로젝션을 하며, 홀로그램 평면에 복원 영상이 위치할 수 있도록 함으로써, 실제감을 증대시키는 방법이다.

이미지 홀로그램 기반의 디지털 홀로그램의 대표적인 장점은 객체를 구성하는 임의의 한 점에 대한 디지털 홀로그램이 크기가 작기 때문에 디지털 홀로그램 고속 생성이 가능하다는 것이다. 이러한 이미지 홀로그램 기반의 디지털 홀로그램 생성 알고리즘을 이용하여 실시간 풀컬러 홀로그래픽 디스플레이 시스템이 2007년에 개발 되었다.

〈그림 3〉에 오브젝트 포인트, 계산이 필요한 홀로그래픽 패턴의 영역 그리고 관찰영역(가상 윈도우)에 대한 광학도면을 나타내었다. 계산 시간은 오브젝트 포인트와 홀로그램간의 거리를 줄임으로써 단축시킬 수 있다. 또한 홀로그램과 가상 윈도우간의 거리를 증가시킴으로써 계산에 따른 부하를 줄일 수 있다. 빔 프로젝터의 상용 제품의 광원부를 개조하여 Holo-Video라고 불리는 홀로그래픽 디스플레이를 만들었다. 1408 × 1058의 해상도를 갖는 3개의 liquid crystal on silicone panels (LCoS)를 풀 칼라 홀로그래픽 디스플레이를 위해 사용을 하였다. 또한 칼라 재생을 위해 백색 광원을 이용하였다. 개

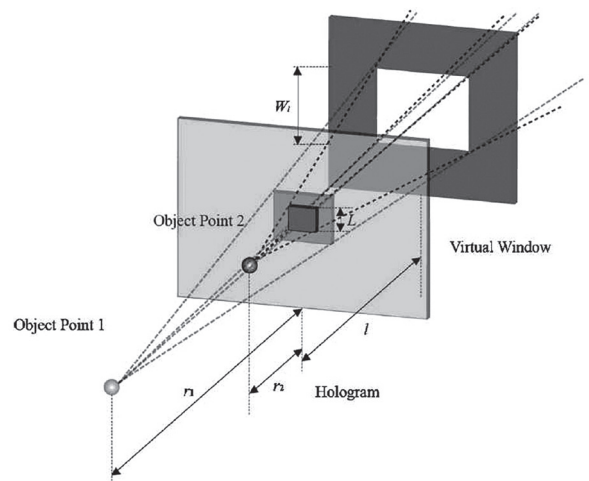


그림 3. 이미지 홀로그램의 계산을 위한 가상의 화면 [47]

인용 컴퓨터(Intel Xeon CPU@3.4 GHz)를 이용하여 홀로그래픽 프린지 패턴을 계산했다. 실험에 3,000 포인트의 데이터를 갖는 객체를 이용했으며, 실시간으로 처리가 가능했다. 본 시스템에 의해 디스플레이 된 광학적 복원 영상을 〈그림 4〉에 나타내었다.

간섭성 홀로그래픽 스테레오그램(coherent holographic stereogram : CS)은 디지털 홀로그램 생성 알고리즘으로써 [49], 기존의 Rayleigh - Sommerfeld (R-S) 기반의 알고리즘보다 그 연산속도가 탁월하다.

연산 가속화의 주된 원인은 디지털 홀로그램 평면을 작은 세그멘테이션으로 분할, 3차원 객체를 구성하는 각 포인트로부터 홀로그램 평면의 각각의 세그멘테이션에 대한 공간 주파수 계산에 따른 현저한 연산량 감소, 분할된 홀로그램의 주파수 평면에 각 포인트에 대한 복소진폭 분포를 기록 및 각각의 분할된 홀로그램 주파수 평면을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transform: FFT)에 의한 처리 등이다.

3. 분할기반 디지털 홀로그램 생성

이러한 과정을 통해 기존 방법에 비해 전체 연산량을 현저히 감소시켰으며, FFT를 이용함으로써 연산속도를 더

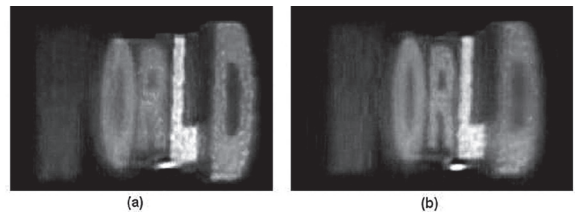


그림 4. 서로 다른 깊이의 관점에서 다섯 글자로 이미지를 복원하였다. 그림(a)는 글자 W와 D에 초점을 맞추었고, 그림(b)는 글자 R에 초점을 맞추었다. [47]

속 가속화 하였다. CGH 연산 방식인 PAS (phase-added stereogram)는 다양한 방법에 의해 더욱 향상된 알고리즘으로 발전하였다[50-56]. 최근에 발표된 CS의 향상된 버전은 accurate compensated phase-added stereogram (ACPAS)이며 이 알고리즘은 기존의 R-S 기반의 알고리즘과 유사한 고화질의 복원영상을 갖는다. ACPAS는 두개의 향상된 알고리즘, compensated phase-added stereogram (CPAS) 와 accurate phase-added stereogram (APAS)의 특성을 이용하여 결합한 알고리즘으로써, 비록 근소화 된 알고리즘이지만 그 정확도 및 복원영상의 화질은 R-S 기반의 복원영상과 매우 유사하여, 고속 및 고화질의 특성을 갖는 미래 홀로그래픽 TV에 적합한 알고리즘이라고 볼 수 있다.

최근에 과학 및 의공학 분야에서 사용되고 있는 복잡한 시뮬레이션을 위한 다양한 병렬처리 컴퓨팅 시스템들이 소개되고 있다. CS 알고리즘은 SIMD (single instruction multiple data) 구조를 갖고 있기 때문에, ACPAS를 비롯한 향상된 버전들은 최근 급속히 발전하고있는 병렬 처리 컴퓨터 기술에 적용하기 매우 용이하며 많은 장점을 얻을 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 10,000 포인트로 구성된 3차원 모델에 대한 1Mega 해상도를 갖는 디지털 홀로그램을 초당 30 프레임으로 실시간 생성이 가능하게 되었다 [57-60].

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 ‘범부처 Giga KOREA 사업’의 일환으로 수행하였음. [GK13D0100, 디지털 홀로그래픽 테이블 탑형 단말 기술 개발]

참고 문헌

- [1] Marc Levoy. Light fields and computational imaging. *Computer*, 39(8):46. 55, 2006.
- [2] James D Trolinger. *Optical holography: Principles, techniques and applications* (2nd edn). Measurement Science and Technology, 8(3), 1997.
- [3] A. Georgiou, J. Christmas, N. Collings, J. Moore, and W. A. Crossland, “Aspects of hologram calculation for video frames,” *Journal of Optics A: Pure and Applied* 36 Optics 10, 035302+, 2008.
- [4] R. Gerchberg and W. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures,” *Optik* 35, 237,246 (1972).
- [5] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, “Iterative fourier-transform algorithm applied to computer holography,” *J. Opt. Soc. Am. A* 5, 1058,1065 (1988).
- [6] J. Fienup, “Iterative method applied to image reconstruction and to computer. generated holograms,” *Optical Engineering* 19, 297 (1980).
- [7] M. Seldowitz, J. Allebach, and D. Sweeney, “Synthesis of digital holograms by direct binary search,” *Applied Optics* 26, 2788,2798 (1987).
- [8] B. K. Jennison and J. P. Allebach, “Analysis of the leakage from computergenerated holograms synthesized by direct binary search,” *J. Opt. Soc. Am. A* 6, 234,243 (1989).
- [9] B. K. Jennison, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, “Efficient design of directbinary - search computer-generated holograms,” *J. Opt. Soc. Am. A* 8, 652,660, 1991.
- [10] T. Dresel, M. Beyerlein, and J. Schwider, “Design of computer-generated beamshaping holograms by iterative finite-element mesh adaption,” *Appl. Opt.* 35, 6865,6874 (1996).
- [11] F. Wyrowski, “Iterative quantization of digital amplitude holograms,” *Appl. Opt.* 28, 3864,3870 (1989).
- [12] 49. T. Haist, M. Schönlaber, and H. J. Tiziani, “Computer-generated holograms from 3d-objects written on twisted-nematic liquid crystal displays,” *Optics Communications* 140, 299 . 308 (1997).
- [13] G. Whyte and J. Courtial, “Experimental demonstration of holographic three dimensional light shaping using a gerchberg-saxton algorithm,” *New Journal of Physics* 7, 117 (2005).
- [14] G. Sinclair, J. Leach, P. Jordan, G. Gibson, E. Yao, Z. J. Laczik, M. J. Padgett, and J. Courtial, “Interactive application in holographic optical tweezers of a multiplane gerchberg-saxton algorithm for three-dimensional light shaping,” *Optics Express* 12, 1665,1670 (2004).
- [15] J. Xia and H. Yin, “Three-dimensional light modulation using phase-only spatial light modulator,” *Optical Engineering* 48, 020502 (2009).

- [16] D. Engstroem, A. Frank, J. Backsten, M. Goksoer, and J. Bengtsson, "Grid-free 3d multiple spot generation with an efficient single-plane fft-based algorithm," *Opt. Express* 17, 9989.10000 (2009).
- [17] J.-Y. Zhuang and O. K. Ersoy, "Fast decimation-in-frequency direct binary search algorithms for synthesis of computer-generated holograms," *J. Opt. Soc. Am. A* 11, 135.143 (1994).
- [18] V. Boutenko and R. Chevallier, "Second order direct binary search algorithm for the synthesis of computer-generated holograms," *Optics Communications* 125, 38 43 . 47 (1996).
- [19] G. Dueck and T. Scheuer, "Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing," *Journal of Computational Physics* 90, 161 . 175 (1990).
- [20] S. Kirkpatrick, C. Gelatt, and M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science* 220, 671 (1983).
- [21] M. Clark and R. Smith, "A direct-search method for the computer design of holograms," *Optics Communications* 124, 150 . 164 (1996).
- [22] L. Ingber, "Very fast simulated re-annealing," Tech. rep.
- [23] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, "Special purpose computer horn-5 for a real-time electroholography," *Optics Express* 13, 1932.1932 (2005). 11a2.
- [24] Y.-H. Seo, H.-J. Cho, and D.-W. Kim, "High-performance cgh processor for realtime digital holography," *Biomedical Optics p. JMA9* (2008).
- [25] T. Ito and T. Shimobaba, "One-unit system for electroholography by use of a special-purpose computational chip with a high-resolution liquid-crystal display toward a three-dimensional television," *Optics Express* 12, 2004 (2004). 11a2. 39
- [26] N. Tanabe, Y. Ichihashi, H. Nakayama, N. Masuda, and T. Ito, "Speed-up of hologram generation using clearspeed accelerator board," *Computer Physics Communications* 180, 1870 . 1873 (2009).
- [27] T. Haist, M. Reicherter, M. Wu, and L. Seifert, "How to use your graphics board for the computation of holograms," *Computing in Science & Engineering* (2005).
- [28] M. Reicherter, T. Haist, S. Zwick, A. Burla, L. Seifert, and W. Osten, "Fast hologram computation and aberration control for holographic tweezers," (*SPIE*, 2005), vol. 5930, pp. 59301Y+.
- [29] T. Shimobaba, Y. Sato, J. Miura, M. Takenouchi, and T. Ito, "Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit," *Opt. Express* 16, 11776.11781 (2008).
- [30] F. Yaras, H. Kang, and L. Onural, "Real-time multiple slm color holographic display using multiple gpu acceleration," (*Optical Society of America*, 2009), OSA Technical Digest (CD), pp. DWA4+.
- [31] M. Montes-Usategui, E. Pleguezuelos, J. Andilla, and E. Martn-Badosa, "Fast generation of holographic optical tweezers by random mask encoding of fourier components," *Opt. Express* 14, 2101.2107 (2006).
- [32] F. Belloni and S. Monneret, "Quadrant kinoform: an approach to multiplane dynamic three-dimensional holographic trapping," *Appl. Opt.* 46, 4587.4593 (2007).
- [33] J. Amako, H. Miura, and T. Sonehara, "Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator," *Appl. Opt.* 34, 3165. 3171 (1995).
- [34] L. Golan and S. Shoham, "Speckle elimination using shift-averaging in high-rate holographic projection," *Opt. Express* 17, 1330.1339 (2009).
- [35] D. O'Brien, T. Wilkinson, and R. Mears, "Programmable cghs with large space bandwidth product," in "4th international Conference on Holographic Systems, Components and Applications, IEEE Proceedings," vol. 379 (1993), vol. 379.
- [36] J. P. Allebach, N. C. Gallagher, and B. Liu, "Aliasing error in digital holography," *Appl. Opt.* 15, 2183.2188 (1976).
- [37] R. Bräuer, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Diffusers in digital holography," *J. Opt. Soc. Am. A* 8, 572.578 (1991).
- [38] H. Aagedal, M. Schmid, T. Beth, S. Teiwes, and

- F. Wyrowski, "Theory of speckles in diffractive optics and its application to beam shaping," *Journal of Modern Optics* pp. 1409,1421 (1996).
- [39] T. Shimobaba, S. Hishinuma, and T. Ito. Special-purpose computer for holography HORN-4 with recurrence algorithm. *Computer Physics Communications*, 148(2):160 . 170, 2002.
- [40] Takashi YABE, Tomoyoshi ITO, and Masashi OKAZAKI. Holography machine HORN-1 for computer-aided retrieval of virtual three-dimensional image. *Japanese journal of applied physics, Pt. 2, Letters*, 32:L1359,L1361, 1993.
- [41] Y. Ichihashi, T. Ito, H. Nakayama, N. Masuda, A. Shiraki, and T. Shimobaba. Development of special-purpose computer HORN-6 for holography. *3D Image Conference 2008*, 2008.
- [42] Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Kotaro Yoshimura, Atsushi Shiraki, Tomoyoshi Shimobaba, and Takashige Sugie. Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography. *Opt. Express*, 13(6):1923,1932, 2005.
- [43] Shimobaba T., , Masuda N, Sugie T, Hosono S, Tsukui S, and Ito T. Specialpurpose computer for holography HORN-3 with pld technology. *Computer Physics Communications*, 130, July 2000.
- [44] T. Ito, T. Yabe, M. Okazaki, and M. Yanagi. Special-purpose computer HORN-1 for reconstruction of virtual image in three dimensions. *Comp. Phys. Commun.*, 82(2-3):104,110, 1994.
- [45] T. Ito, H. Eldeib, K. Yoshida, S. Takahashi, T. Yabe, and T. Kunugi. Special-purpose computer for holography HORN-2. *Comp. Phys. Commun.*, 93:13,20, 1996.
- [46] Tomohisa Hamano and Hiroshi Yoshikawa. Image-type CGH by means of e-beam printing. In *SPIE, Practical Holography XII*, volume 3293, pages 2,14, 1998.
- [47] Takeshi Yamaguchi, Gen Okabe, and Hiroshi Yoshikawa. Real-time image plane full-color and full-parallax holographic video display system. *Optical Engineering*, 46(12):125801, 2007.
- [48] Takeshi Yamaguchi and Hiroshi Yoshikawa. Real time calculation for holographic video display. In *SPIE, Practical Holography XX: Materials and Applications*, volume 6136, page 61360T, 2006.
- [49] Toyohiko Yatagai. Stereoscopic approach to 3-D display using computergenerated holograms. *Appl. Opt.*, 15(11):2722,2729, 1976.
- [50] Hoonjong Kang, Takeshi Yamaguchi, Hiroshi Yoshikawa, Seung-Cheol Kim, and Eun-Soo Kim. Acceleration method of computing a compensated phaseadded stereogram on a graphic processing unit. *Appl. Opt.*, 47(31):5784, 5789, 2008.
- [51] Hoonjong Kang, Takeshi Yamaguchi, and Hiroshi Yoshikawa. Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram. *Appl. Opt.*, 47(19):D44,D54, 2008.
- [52] Hoonjong Kang, Tomohiko Fujii, Takeshi Yamaguchi, and Hiroshi Yoshikawa. Compensated phase-added stereogram for real-time holographic display. *Optical Engineering*, 46(9):095802, 2007.
- [53] H. Yoshikawa J. Tamai. Faster computation of subsampled coherent stereogram (in japanese). In *The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan*, volume 50, pages 1612,1615, 1996.
- [54] Masahiro Yamaguchi, Hideshi Hoshino, Toshio Honda, and Nagaaki Ohyama. Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique. In *Practical Holography VII: Imaging and Materials*, volume 1914, pages 25,31, SPIE, 1993.
- [55] Hiroshi Yoshikawa and Hirokazu Kameyama. Integral holography. In *Practical Holography IX*, volume 2406, pages 226,234, SPIE, 1995.
- [56] H. Kang. Quality improvements of the coherent holographic stereogram for natural 3D display and its applications. In *PhD. Thesis*, Nihon University, 2008.
- [57] Hoonjong Kang, Fahri Yara,s, Levent Onural, and Hiroshi Yoshikawa. Realtime fringe pattern generation with high quality. In *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, page DTuB7, Optical Society of America, 2009.
- [58] Fahri Yara,s, Hoonjong Kang, and Levent Onural.

Real-time multiple SLM color holographic display using multiple GPU acceleration. In Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, page DWA4, Optical Society of America, 2009.

- [59] H. Kang, F. Yaras, and L. Onural. Quality comparison and acceleration for digital hologram generation method based on segmentation. In 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, IEEE, 2009.
- [60] F. Yaras, H. Kang, and L. Onural. Real-time color holographic video display system. In 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, IEEE, 2009.

약 력



강 훈 종

1998년 광운대학교 공학사
 2001년 광운대학교 공학석사
 2008년 Nihon University 공학박사
 1999년~2002년 3D 코리아 연구원
 2002년~2006년 한국전자통신연구원 방송시스템 연구부 연구원
 2008년~2010년 Bilkent University, Project researcher [The European FP7 Real3D Project]
 2010년~현재 전자부품연구원 디지털 홀로그래피 연구팀 책임연구원
 관심분야: 디지털 홀로그래피, 3D 디스플레이



민 병 기

1980년 서울대 전자공학과(학사)
 1982년 KAIST 전기 및 전자공학과(석사)
 1991년 Telecom ParisTech(ENST) 전자공학과(박사)
 1982년~2000년 한국전자통신연구원(책임연구원)
 2000년~현재 아스텔 (연구소장)
 관심분야: VLSI 구조, 멀티미디어 ASIC



홍 성 희

1999년 2월: 성균관대학교 공학사
 2001년 2월: 성균관대학교 공학석사
 2007년 2월: 성균관대학교 공학박사 수료
 2000년 12월 ~ 현재: KETI 실감정보플랫폼연구센터 책임연구원
 관심분야: IPTV, 3D, Hologram,



김 영 민

2005년 서울대학교 공학사
 2011년 서울대학교 공학박사 (석박사통합)
 2011년~2011년 서울대학교 BK 박사 후 연구원
 2011년~현재 전자부품연구원 선임연구원
 관심분야: Interactive 3D display, Holographic display, visual fatigue associated with 3D displays