

# 분할방식 기반의 고속 디지털 홀로그램 생성 알고리즘 연구

황이환, 김승현, 홍성희, 신춘성, 김영민, 홍지수, 강훈중

전자부품연구원

hoonjongkang@keti.re.kr

## Segmentation based fast digital hologram generation method

Leehwan Hwang, Seunghyeon Kim, Sung-Hee Hong, Choon-Sung Shin, Young-Min Kim,

Ji-Soo Hong, Hoonjong Kang

Korea Electronic Technology Institute

### 요약

본 논문은 기존에 홀로그램 생성에 사용하던 R-S알고리즘과 유사한 품질을 지니며 빠른 속도의 연산으로 홀로그램 디스플레이와 프린팅 시스템을 위한 콘텐츠의 생성에 필요한 고속 연산 알고리즘인 FPAS에 대한 소개이다. 소개된 연산방법은 기존의 홀로그램 분할 방식을 일반화함으로써 미세한 빔의 조종으로 개선된 알고리즘으로 제안하며, 생성된 프린지 패턴에서 회절된 파면을 R-S알고리즘으로 계산한 결과와 매우 유사한 재구성 품질을 표현할 뿐만 아니라, 각 오브젝트 포인트의 기여도로부터 분할단계에서 보다 빠르게 계산 속도를 향상시킬 수 있는 접근법으로 디지털 홀로그램 생성의 속도를 단축시킬 수 있는 알고리즘을 소개하여 홀로그램을 사용하는 다양한 분야에 응용시키는 것에 목적이 있다.

### 1. 서론

홀로그램 디스플레이 및 프린팅 시스템을 위한 홀로그램 콘텐츠의 생성은 고속 연산 알고리즘의 개발을 필요로 한다. 계산된 프린지 패턴에서 회절된 파면은 Rayleigh-Sommerfeld (R-S) 회절방식을 기반으로 한 것과 매우 유사한 파면의 재구성을 유도해야 한다. 이 방식은 포인트 클라우드로 만들어진 객체에 대해 정확한 프린지 패턴을 제공해야 한다. 웨이브 필드의 복소 진폭은 홀로그램 평면에서 구형파의 합으로 표현되며 다음 식에 의해 산출된다.

$$S(\xi, \eta) = \sum_{p=1}^P \frac{A_p}{r_p} \exp(jkr_p), r_p = \sqrt{(\xi - x_p)^2 + (\eta - y_p)^2 + z_p^2} \quad (1)$$

여기서  $(x_p, y_p, z_p)$ 는 오브젝트 포인트의 데카르트 좌표들,  $A_p = a_p \exp(j\phi_p)$ 은 이 포인트에서 방사되는 라이트 필드의 진폭  $a_p$ 와 위상  $\phi_p$ 로 나타내며,  $r_p$ 는 이 포인트와 홀로그램 평면에서의 해당 픽셀과의 거리를,  $k = 2\pi/\lambda$ 는 파수를,  $P$ 는 포인트의 수를 의미한다. R-S 접근 방법의 계산 복잡도는  $O(PKL)$ 이며, 여기서  $K \times L$ 은 픽셀 단위의 홀로그램 크기이다 (그림1). (1)의 빠른 구현을 위한 성공적인 접근법은 홀로그램 평면에 입사되는 각 구형 파면을 평면파 세그먼트로 분할하는 방식이며, 이에 대한 기존의 방법은 phase-added stereogram (PAS) [1], compensated phase-added stereogram(CPAS) [2], accurate phase-added stereogram(APAS) [3, 4] 그리고 accurate compensated phase-added stereogram(ACPAS) [5] 등이 있다.

본 논문은, 기존의 홀로그램 분할 방식을 일반화함과 동시에, 정확한 위상 매칭으로 인해 회절 품질을 증대시킬 수 있는 fast phase-added stereogram(FPAS) 계산 알고리즘을 제안한다.

### 2. 본론

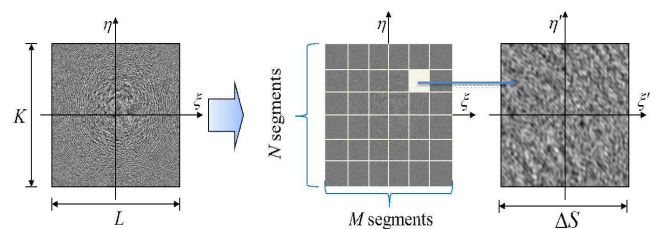


그림 1.  $\Delta S \times \Delta S$  정사각형 모양으로 분할된 디지털 홀로그램 평면도

홀로그램 평면은  $M \times N$  개의 정사각형 세그먼트로 나뉜다(그림 1). 각 세그먼트에서의 FPAS의 수치 모델은 다음과 같이 산출된다.

$$H_{mn}(\xi, \eta) = F^{-1}\{I_{mn}(\mu, \nu)\} \quad (2)$$

$$I_{mn}(\mu, \nu) = \sum_{p=1}^P \frac{a_p}{r_{pmn}} \exp[j(kr_{pmn} + \phi_p)] \times \exp\{i2\pi[\mu_{pmn}(x - \xi_p) + \nu_{pmn}(\eta - y_p)]\} \times \delta(\mu - \mu_{pmn}, \nu - \nu_{pmn}) \quad (3)$$

여기서,  $H_{mn}(\xi, \eta)$ 은  $m \times n$  세그먼트이고,  $I_{mn}(\mu, \nu)$ 는 공간 주파수 도메인에서의 공간 주파수 분포이다. 거리  $r_{pmn}$ 은 세그먼트 좌표계  $(\xi', \eta')$ 에 대한 로컬의 원점과 일치하는 세그먼트 중심점에 대해 결정된다. 공간 주파수  $\mu_{pmn}$ 과  $\nu_{pmn}$ 은 중심점에 대해서도 결정된다. R-S 회절 방식(1)과 마찬가지로, 이들은  $\mu_{pmn} = \lambda^{-1}(\sin\theta_{\xi pmn} - \sin\theta_{r\xi})$ ,  $\nu_{pmn} = \lambda^{-1}(\sin\theta_{\eta pmn} - \sin\theta_{r\eta})$ 에 의해 주어지며, 여기서  $\theta_{\xi pmn}$ 과  $\theta_{\eta pmn}$ 은 연관된 오브젝트 포인트로부터의 입사각이며,  $\theta_{r\xi}$ 과  $\theta_{r\eta}$ 은  $\xi$ 와  $\eta$ 축에 대한 기준과의 조사되는 각도이다.

그림2는 홀로그램 연산의 가속화를 유도하는 두 단계를 보여준다. 각 세그먼트(그림2a)위의 프린지 패턴은 2D 복소 사인 곡선의 중첩으로 근사된다. 실제로 평면 내의 공간좌표에 대한 임의의 홀로그램 함수는 조화파의 중첩으로 기록될 수 있다. 이 세그먼트에 대한 오브젝트 포인트  $p$ 에 해당하는 정현파는 공간 주파수  $(\mu_{pmn}, \nu_{pmn})$ 과 거리 위상  $kr_{pmn}$ 을 갖는다. 조화파는 임펄스의 함수의 역 푸리에 변환이다. 이는 주파수 도메인에서 복소 진폭 및 위치로써 단일 오브젝트 포인트로부터의 기여도를 나타낼 수 있음을 의미한다. 따라서, 각 세그먼트와 관련된 스펙트럼(3)은 그림2b에서 표현한 바와 같이 복소 정현파의 진폭을 주파수 위치에 대응시켜 배치함으로써 쉽게 구성된다. 푸리에 변환의 선형성으로 인해, 모든 3D 오브젝트 포인트로부터의 기여로 구성된 세그먼트의 스펙트럼의 IFFT는 그 세그먼트 위로 홀로그램을 나타내게 한다. 이 순서는 각 세그먼트에 대한 계산을 완료하기 위해 반복된다. 포인트 클라우드에서 점들의 기여와 관련된 공간 주파수는 그들의 복잡한 진폭을 변화시키지 않으면서 이들을 가장 가까운 값으로 허용되는 이산 주파수 값  $\hat{\mu}_{pmn}$ 와  $\hat{\nu}_{pmn}$ 으로 이동시킴으로써 이산 도메인에서 양자화된다. 이 변화는 재구성하는 과정에서 추가적인 왜곡의 원인이 된다. 값  $\hat{\mu}_{pmn}$ 와  $\hat{\nu}_{pmn}$ 은 실수값  $(\mu_{pmn}, \nu_{pmn})$ ,  $p = 1, 2, 3, \dots, N$ 과는 다르다. 세그먼트 위의 홀로그램이 좌표  $(\xi', \eta')$ 에 쓰이면서 생긴 디지털화로 인한 오류는  $e = \exp\{-j2\pi(\Delta\mu_{pmn}\xi' + \Delta\nu_{pmn}\eta')\}$ 로 나타난다. 오류는 더 작은 디지털화 단계로 이산화 된 공간 주파수 영역에서 줄일 수 있다. 이러한 오류를 줄이기 위해 IFFT 크기는 근사화 (2)-(3)의 높은 품질을 보장하기 위해 작게 유지되어야 하는 세그먼트 크기보다 크게 선택이 된다. 그림2c는 R-S 알고리즘과 개발된 FPAS 알고리즘에 대한 실제 재구성 품질을 보여준다.

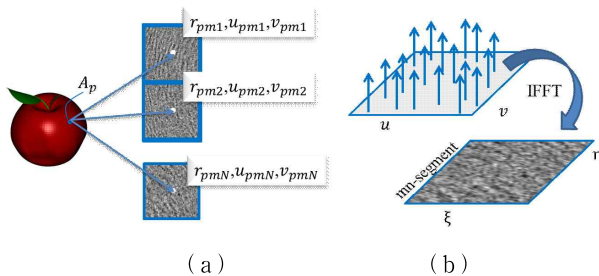


그림 2. (a)포인트 클라우드로부터 FPAS를 위한 계산의 기하학 도식, (b)공간 주파수 분포의 IFFT에 의한 세그먼트 내의 홀로그램의 계산, (c) 사용된 3D 장미 모델 이미지와 재구성된 이미지 : (왼쪽) 3D모델, (가운데) R-S알고리즘, (오른쪽) FFT 64x32 픽셀크기를 갖는 FPAS

## 2. 결론

코히런트 스테레오그램 접근법으로 제안된 FPAS 알고리즘은 먼저 각 오브젝트 포인트의 기여도가 각 세그먼트의 중심 픽셀에만 계산되는 분할 단계에 의해 계산 속도를 크게 향상시키며 모든 오브젝트 포인트의 기여의 중첩으로써 세그먼트 프린지 패턴을 계산하는 IFFT의 사용에 의해 표현이 된다. FPAS에 의해 제공되는 재구성 품질은 기존의 R-S 알고리즘의 품질과 유사하다. 또한, 컴퓨팅 시스템은 멀티 코어 CPU와 GPU를 지원하는 병렬처리가 가능하다. 이는 FPAS알고리즘의 초기 홀로그램 분할에 적합함을 확인할 수 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2017-0-00417-002, 디지털 홀로그램 콘텐츠 제작과 시뮬레이션을 위한 오픈 라이브러리 기술 개발)

## 참 고 문 헌

[1] M.Yamaguchi, H.Hoshino, T.Honda, N. Ohya, "Phase added stereogram: calculation of hologram using computer graphic technique.", Proc. SPIE **1914**, 25-33 (1993).  
 [2] H. Kang, T. Fujii, T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, "A Compensated Phase-Added Stereogram for Real-Time Holographic Display", Opt. Eng. **46**, 095802-1-095802-11(2007).  
 [3] H. Kang, T.Yamaguchi, H.Yoshikawa, "Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram", Applied Optics **47**, D44-D54 (2008).  
 [4] H. Kang, T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, S.C.Kim, E.S.Kim, "Acceleration method of computing a compensated phase-added stereogram on a graphic processing unit. ", Appl.Opt. **47**, 5784-5789 (2008).  
 [5] H. kang, F. Yaras, L. Onural, "Graphics processing unit accelerated computation of digital holograms", Appl.Opt. **48**, H137-H143 (2009).