

디지털 홀로그래픽 콘텐츠 생성 및 복원 기술

오승택, 황치영, 이범렬, 정일권
한국전자통신연구원

요약

본 고에서는 디지털 홀로그래픽의 생성 및 복원 방법에 관한 주요 이슈를 다룬다. 디지털 홀로그래픽 특히 컴퓨터 생성 홀로그래픽은 최근 디지털 디스플레이 및 고속 병렬 컴퓨팅 기술의 발달과 더불어 급속한 발전을 보이고 있다. 컴퓨터 생성 홀로그래픽은 메쉬, 점 집합 등으로 구성된 가상 객체의 표면에서 발생한 광파가 회절되는 분포를 수치 계산하여 생성된다. 이를 위하여 파동방정식으로부터 유도되는 주요 회절식들을 살펴보고 이를 바탕으로 한 수치 계산 모델을 제시한다. 생성된 디지털 홀로그래픽을 광학 장치를 통한 재생 없이 수치적 복원을 통해 복원 결과를 확인하는 기법과 관련 이슈 또한 설명한다.

I. 서론

홀로그래피는 빛의 공간적인 광파 분포를 변조하여 완벽한 3차원 입체 영상을 만드는 기술이다[1]. 1948년 데니스 가보(Dennis Gabor)에 의해 처음 원리가 제안된 이후 오늘날까지 다양한 영역에서 활용되어 왔다. 기본적으로 빛은 특정 파장 대역에 해당하는 전자기파의 한 종류이며, 따라서 파동성에 의한 진폭과 위상의 두 가지 특성을 모두 고려해야 한다. 우리가 사물을 바라볼 때 자연스러운 입체감을 느끼는 이유는 그 사물에 의해 회절 되어 눈으로 들어오는 빛의 진폭과 위상이 입체 정보를 담고 있기 때문이다. 반면, 기존의 사진이나 2D 영상은 특정 각도에서 획득한 빛의 세기 분포만을 제공하기 때문에 관찰자가 입체감을 느낄 수 없다. 홀로그래피는 물체파(object wave)와 기준파(reference wave)의 간섭 무늬 패턴을 필름에 기록하여 물체파의 위상 정보까지 재생하게 되어 자연스러운 입체 영상 구현이 가능하다[2][3][4].

홀로그래피 기술은 디지털 소자 기술의 발전에 따라 디지털 영역으로 확장되었다. 디지털 홀로그래픽은 간섭무늬 기록을 위해 아날로그 필름 대신 전하결합소자(charge-coupled device,

CCD)를 이용하거나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 간섭무늬 패턴을 생성하여 만들어 진다. 디지털 홀로그래픽의 가장 큰 특징은 실제 객체는 물론 가상의 객체에 대한 정지, 동영상 홀로그래픽 생성이 가능하고 디지털의 특성상 편집과 합성 등의 후처리(post-processing)가 자유롭다는 것이다.

일반적으로 디지털 홀로그래픽은 픽셀을 직사각형의 2차원 어레이 형태로 배열한 구조를 갖는다. 이때 픽셀 간의 간격, 픽셀의 개수 등에 의해 홀로그래픽의 주요 물리적 특성이 결정된다. 픽셀 간의 간격이 작을 수록 큰 각도의 회절이 이루어져 홀로그래픽을 관찰할 수 있는 시야각이 넓어지게 되며 픽셀 개수는 홀로그래픽이 표현할 수 있는 정보량과 관계가 있다. 디지털 홀로그래픽은 공간광변조기(spatial light modulator, SLM)라고 불리는 디스플레이 소자를 통해 광학적으로 재생되며 공간광변조기의 제원 및 물리적 특성을 반영하여 디지털 홀로그래픽을 생성하는 것이 효과적이다.

물체 표면에서 발생하는 광파를 컴퓨터 시뮬레이션 하여 생성되는 컴퓨터 생성 홀로그래픽(computer-generated hologram, CGH)[5][6][7]은 방대한 계산량이 필요하며 GPGPU(general purpose graphics processing unit)등을 활용한 고속 계산 알고리즘이 활발히 연구되고 있다. 최근의 GPU는 프로그래밍이 가능하도록 설계되고 있으며 CPU(central processing unit)에 비하여 개별 코어의 계산 속도는 느리지만 수백에서 수천 개의 병렬 코어를 활용하여 FPGA(field-programmable gate array)를 이용한 하드웨어적인 접근에 비해 컴퓨터 생성 홀로그래픽의 생성 및 복원 등의 처리에서 높은 자유도와 활용성을 제공하고 있다. 사전에 생성된 계산 테이블을 통해 계산 복잡도를 줄여 컴퓨터 생성 홀로그래픽의 계산 속도를 높이는 연구와 컴퓨터 그래픽스의 텍스처(texture), 라이팅(lightning), 셰이딩(shading)등의 기법을 적용하여 컴퓨터 생성 홀로그래픽의 품질을 실사 수준으로 향상시키는 연구 또한 진행되고 있다.

본 고에서는 컴퓨터 생성 홀로그래픽을 위한 주요한 광파의 회절식을 소개하고 이를 기반으로 한 수치 시뮬레이션 기법을 통해 컴퓨터 생성 홀로그래픽을 생성, 복원하는 기법을 설명하고자 한다. 이를 위하여 2절에서는 광파의 회절식을 설명하고 3절에

서는 가상 객체 모델에 대한 컴퓨터 생성 홀로그램 방법 및 생성 결과 확인을 위한 수치적 복원 기법에 대하여 설명하고 4절에서는 결론을 기술한다.

II. 광파의 회절식

광파의 회절식은 컴퓨터 생성 홀로그램의 핵심 요소이다. 회절식은 빛이 공간에 전파되어 가는 현상을 설명하는 파동방정식으로부터 유도된다. 본 절에서는 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식, 프레넬 회절 적분식, 각 스펙트럼 기반 회절식에 대해 알아본다.

1. Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식

불투명한 평면에 구멍을 뚫고 여기에 빛을 통과 시키는 경우를 생각해 보자(그림 1).

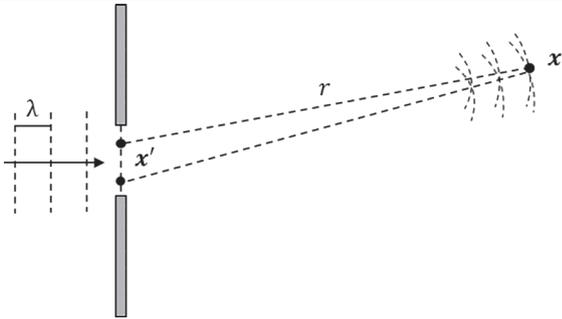


그림 1. 개구(aperture)에 의한 빛의 회절

이 경우 적절한 경계조건의 설정이 가능하며 파동방정식의 해는 Rayleigh-Sommerfeld 회절식이라 불리는 다음의 간단한 적분식으로 표현이 가능하다. 즉, 공간의 임의의 점 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ 에서의 회절된 빛의 분포 $U(\mathbf{x})$ 는

$$U(\mathbf{x}) = \iint_{x' \in \Sigma} \tilde{U}(\mathbf{x}') \frac{\exp(jkr)}{r} d\mathbf{x}' \quad (1)$$

이 된다[8]. 여기서, Σ 는 개구(aperture), \tilde{U} 는 Σ 에서의 빛의 분포, k 는 파동수(wavenumber), $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|$ 이다. Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식을 살펴보면 회절된 빛은 개구에서 발생한 구면파(spherical wave)의 합으로 표현됨을 알 수 있다. 이는 호이겐스-프레넬 원리라는 이름으로 알려져 있다.

2. 프레넬 변환 회절식

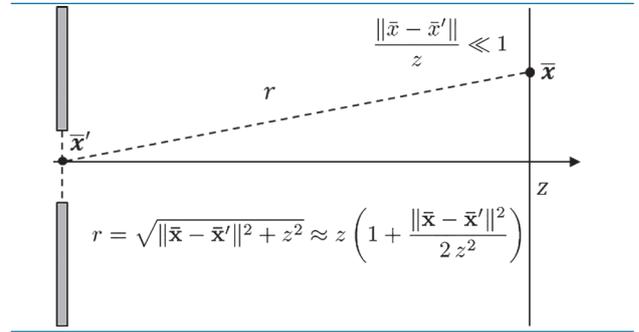


그림 2. 충분히 떨어진 두 평면 간의 프레넬 근사

앞의 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식은 개구에서 멀리 떨어진 곳에서는 프레넬 근사(Fresnel approximation)(그림 2)를 통해 푸리에(Fourier) 변환으로 표현이 가능하며 이때 유도된 적분식을 프레넬 변환(Fresnel transform)이라고 부른다. 프레넬 변환은 충분히 떨어진 평행한 두 평면 P_1, P_2 간의 빛의 진행을 나타내며 다음과 같이 표시된다[8]. 즉, P_2 위의 점 $\bar{\mathbf{x}} = (x, y)$ 에 대해

$$U(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint_{P_1} \tilde{U}(\bar{\mathbf{x}}') \exp\left(j\frac{k}{2z}\|\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}'\|^2\right) d\bar{\mathbf{x}}' \quad (2)$$

이다. 이때, z 는 평면 간의 거리이며, λ 는 파장(wavelength), \tilde{U} 는 출발 평면에서의 빛의 분포이다. 식 (2)로부터 도달 평면에서의 빛의 분포는 출발 평면에서의 빛의 분포와 커널(kernel) $\exp(jk/2z\|\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}'\|^2)$ 의 합성곱 적분(convolution)으로 표현됨을 알 수 있다. 커널식에서 위상 항을 전개하여 정리하면 프레넬 변환 식은 다음과 같이 표현될 수도 있다.

$$U(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j\frac{k}{2z}\|\bar{\mathbf{x}}\|^2\right) \iint \tilde{U}(\bar{\mathbf{x}}') e^{j\frac{k}{2z}\|\bar{\mathbf{x}}'\|^2} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda z}\bar{\mathbf{x}} \cdot \bar{\mathbf{x}}'\right) d\bar{\mathbf{x}}' \quad (3)$$

식 (2)는 합성곱의 푸리에 변환 성질로부터 최소 2번의 푸리에 변환을 통해 평면간의 회절을 계산할 수 있고 식 (3)의 경우 1번의 푸리에 변환을 포함하게 된다.

3. 각 스펙트럼 기반 회절식

푸리에 이론에 의하면 임의의 빛의 분포는 평면파(plane wave)의 합으로 표현할 수 있으며 파동방정식의 해도 평면파의 합으로 표현이 가능하다. 이제, 평면 P_1 위의 점 $\mathbf{x} = (x, y, 0)$ 에서의 빛의 분포가 다음과 같다고 하자.

$$U(\mathbf{x}) = \iint A(\mathbf{u}) \exp(j2\pi \mathbf{x} \cdot \mathbf{k}(\mathbf{u})) d\mathbf{u} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{u} = (\alpha, \beta)$ 는 공간 주파수(spatial frequency) 짝이고, $\mathbf{k}(\mathbf{u}) := (\mathbf{u}, (1/\lambda^2 - \|\mathbf{u}\|^2)^{1/2})$ 는 파동 벡터(wavevector), $A(\mathbf{u})$ 는 평면 P_1 에서의 빛의 분포 $U(\mathbf{x})$ 에 대한 푸리에 계수가 되며 푸리에 계수의 모임을 각 스펙트럼(angular spectrum)이라고 부른다. 이제 P_1 과 평행하며 거리가 z 만큼 떨어진 평면 P_2 에서 점 $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + (0, 0, z)$ 에서의 빛의 분포는 다음과 같은 푸리에 적분으로 표시된다.

$$U(\mathbf{x}') = \iint A(\mathbf{u}) \exp(j2\pi z\gamma) \exp(j2\pi \mathbf{x} \cdot \mathbf{k}(\mathbf{u})) d\mathbf{u} \quad (5)$$

이때, $\gamma = (1/\lambda^2 - \|\mathbf{u}\|^2)^{1/2}$ 이다. 식 (5)로부터 두 평면간의 빛의 진행은 각 스펙트럼 $A(\mathbf{u})$ 의 변형인 $A'(\mathbf{u}) = A(\mathbf{u}) \exp(j2\pi z\gamma)$ 에 대한 푸리에 역변환으로 표현됨을 알 수 있다[8].

식(5)으로부터 프레넬 근사를 이용하면 프레넬 회절 적분식 (2)의 유도가 가능하며 충분히 떨어진 평행한 평면 간의 빛의 진행 상황에서 식 (1), (2), (3)은 모두 물리적으로 동일한 식임을 알 수 있다.

각 스펙트럼 기반 회절식의 특징은 서로 평행하지 않은 두 평면 간의 빛의 진행도 표현할 수 있다는 것이다[9][10][11]. $A(\mathbf{k}(\mathbf{u})) := A(\mathbf{u})$ 라 하고 평행하지 않은 두 평면간의 회절식은 다음과 같다.

$$U(\mathbf{x}') = \iint A'(\mathbf{u}') \exp(j2\pi \mathbf{x}' \cdot \mathbf{k}(\mathbf{u}')) d\mathbf{u}' \quad (6)$$

이때,

$$A'(\mathbf{u}') = JA(\mathbf{Rk}(\mathbf{u}')) \exp(j\mathbf{k}(\mathbf{u}') \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{b}) \quad (7)$$

$$\mathbf{k}(\mathbf{u}') = \mathbf{R}^T \mathbf{k}(\mathbf{u}), \quad J = \frac{\gamma}{\gamma'} \quad (8)$$

이고 \mathbf{R} 은 회전행렬, \mathbf{b} 는 평행이동벡터로서 두 평면간의 좌표 변환 $\mathbf{x} = \mathbf{R}\mathbf{x}' + \mathbf{b}$ 를 만족하게 된다(그림 3).

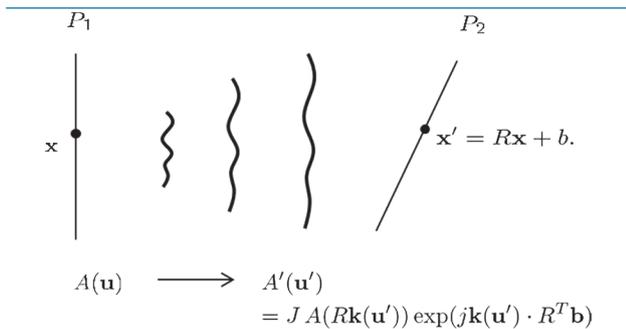


그림 3. 평행하지 않은 평면 간의 좌표변환과 이에 따른 각 스펙트럼의 회전 및 진행

Ⅲ. 디지털 홀로그램의 생성 및 복원

이제 가상의 객체에 대한 컴퓨터 생성 홀로그램을 생성하고 이를 수치적으로 복원하는 기법에 대해 설명한다.

1. 점 집합 기반 방법

가상 객체 모델은 그 객체를 구성하는 점들의 집합(point cloud)으로 표현될 수 있다. 이 경우 Rayleigh-Sommerfeld 회절식 적용이 가능하며 객체를 구성하는 각 점을 점 광원으로 모델링 하여 각 점 광원에서 발생된 구면파를 홀로그램 평면에서 모두 더함으로써 홀로그램을 생성할 수 있다[7][12][13]. 식 (1)로부터 점 집합 기반의 홀로그램 생성을 표현하는 수식은 다음과 같다.

$$U(\mathbf{x}) = \sum_k^n A_k \frac{\exp(j2\pi \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|)}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{x}_k 는 가상 객체를 구성하는 k 번째 점 광원의 위치, n 는 점 집합을 구성하는 점의 개수, A_k 는 k 번째 점 광원에 의해 발생하는 광파의 진폭 및 초기위상을 결정한다. <그림 4>는 점 집합 기반 홀로그램 생성의 예이다.

점 집합 기반 홀로그램 생성에서 한 가지 고려해야 할 것은 구면파의 주파수 패턴과 샘플링 이론에 기인한 광파 기록 영역의 제한이며 다음 식으로 표현된다[14].

$$r = \frac{\lambda d}{2\Delta p} \quad (10)$$

여기서 r 은 점 광원이 홀로그램 평면에 수직 투영된 위치로부터 기록 가능한 최대 거리, d 는 점 광원으로부터 홀로그램 평면까지의 수직 투영 거리, 그리고 Δp 는 샘플링 간격을 나타낸다.

점 집합 홀로그램 생성 방식은 계산 복잡도가 매우 높지만 병렬화 및 LUT(look-up table)등을 통해 홀로그램 고속 생성이 용이한 특징이 있다. 최근 급속히 발전하고 있는 GPU기술에 기반하여 수백에서 수천 개의 GPU 코어를 이용한 고속 병렬화 알고리즘[15][16][17]이 활발히 연구되고 있으며 LUT기법은 구면파의 특성을 고려하여 복잡도가 높은 반복적인 계산을 메모리에 사전 저장하고 사용함으로써 계산복잡도 자체를 낮추어 홀로그램을 고속 생성하는 기법이다[12][18~21].

점 집합 기반의 홀로그램 생성의 경우 점의 개수가 충분하지 않으면 복원 이미지에서 객체를 이루는 점들 사이의 빈 공간이 관찰된다는 단점이 있다. 이는 식 (1)에서도 확인할 수 있듯이

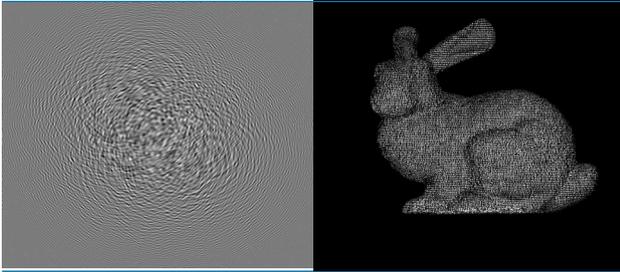


그림 4. 점 기반 홀로그램 생성을 이용한 34,834개의 점으로 표현된 버니 모델 홀로그램 생성 및 수치적 복원 결과

점과 가까이 질 수록 해당 점 광원의 진폭이 매우 급격하게 증가하기 때문이다. 객체 모델의 샘플링 수를 더 늘릴 수 없는 경우, 부드럽게 연결된 객체 표면을 표현하기 위해 가우시안 보간(gaussian interpolation) 기법을 활용할 수 있다[15]. 이 기법은 점 광원 대신 유한한 범위를 갖는 영역에서 부드럽게 감소하는 가우시안 분포를 사용한다. 가우시안 함수에 의한 평활화(smoothing) 효과에 의해 점 개수의 증가 없이도 부드러운 객체 표면을 반영할 수 있다.

2. 폴리곤 기반 방법

가상의 객체가 폴리곤의 집합으로 표현되어 있다고 하자. 이것은 컴퓨터 그래픽스에서 널리 사용되는 3차원 객체의 표현 방법으로 메쉬라고 부르며 객체의 표면을 삼각형으로 이어 붙여 표현하는 것이 일반적이다.

삼각형 메쉬로 표현된 객체에서 발생하는 광파는 각각의 삼각형을 개구로 간주하여 이로부터 회절 되는 광파를 중첩하여 표현할 수 있다. 일반적으로 각각의 삼각형은 홀로그램 평면과 평행하지 않으므로 각 스펙트럼 기반 회절식 (6)을 사용할 수 있으며 이 과정에서 푸리에 변환은 효율적인 FFT(fast Fourier transform)을 통해 수치 계산된다.

좀 더 자세히 설명하면 i -번째 삼각형에서의 빛의 분포를 U_i 라고 하면 푸리에 변환을 통해 각 스펙트럼 $A_i = FFT[U_i]$ 를 구하고 이를 다시 식(6)에 의해 회전, 진행된 새로운 각 스펙트럼 A'_i 을 얻고 역방향 푸리에 변환을 적용하여 최종적으로 홀로그램에서의 빛의 분포 $U'_i = FFT^{-1}[A'_i]$ 를 얻는다. 이 과정을 모든 삼각형에 대해 수행하여 중첩하면 주어진 삼각형 메쉬에 대한 물체파를 계산할 수 있으며 이로부터 삼각형 메쉬로 표현된 가상 객체에 대한 홀로그램을 생성할 수 있다[22][23].

<그림 5>는 각 스펙트럼 기반 회절식을 이용하여 버니 모델에 대한 컴퓨터 생성 홀로그램과 이를 수치적으로 복원한 결과 이미지이다. 이와는 다른 방향으로 Rayleigh-Sommerfeld 회절식을 이용한 삼각형 메쉬 객체의 홀로그램 생성 기법 또한 연구되고 있다[24].

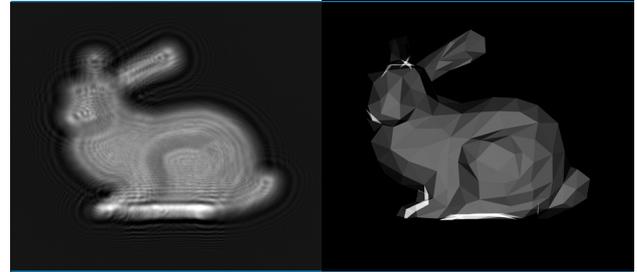


그림 5. 각 스펙트럼 기반 회절식을 이용한 544개의 삼각형으로 표현된 버니 모델에 대한 홀로그램 생성 및 수치적 복원 결과

3. 섹션 이미지 기반 방법

앞에서는 가상 객체가 포인트 집합 혹은 삼각형 메쉬로 표현된 경우에 대한 컴퓨터 생성 홀로그램의 생성 방법에 대해 살펴보았다. 이와는 다른 방법으로 가상 객체의 섹션 이미지를 이용하여 컴퓨터 생성 홀로그램을 생성하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

먼저 가상 객체가 홀로그램과 평행인 섹션에 의해 분할 되었다고 하자. i -번째 섹션 분할 이미지의 픽셀 세기를 이용하면 객체에서 발생하는 광파에 대한 해당 섹션에서의 분포 U_i 를 구할 수 있다. 이제 섹션과 홀로그램 평면과의 평행 성질을 이용하면 프레넬 변환식 (2) 또는 (3), 각 스펙트럼 기반 회절식 (5)를 적용하여 해당 섹션과 홀로그램 평면 간의 빛의 진행을 계산할 수 있다. 이 과정을 모든 섹션에 대해 수행하여 결과를 중첩하면 가상 객체에 대한 컴퓨터 생성 홀로그램을 생성할 수 있다[25][26].

이 방법은 가상 객체가 깊이 맵으로 표현되어 있거나 2D 이미지인 경우에 효과적으로 사용할 수 있다. 특히, 2D 이미지의 경우 단 한번의 푸리에 변환을 통해 고속으로 홀로그램을 얻을 수 있게 된다.

4. 수치적 복원

생성된 홀로그램의 재생 영상을 검증하기 위해서는 복원 과정이 요구된다. 홀로그램의 복원은 수치적 복원과 광학적 복원으로 나누어진다. 수치적 복원이란 홀로그램으로부터 생성되는 광파의 진행 및 그 영상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하는 것이다. 광학적 복원은 전자 소자 및 광학 기기를 사용하여 홀로그램에 의한 광파 분포를 실제 공간상에 만들어내는 것을 지칭한다. 광학 복원 소자에 의한 제약이 많은 광학적 복원과 달리, 수치적 복원의 경우 곡면 홀로그램 또는 구형 홀로그램과 같은 다양한 유형의 홀로그램 복원이 가능하다[27][28][29]. 본고에서는 앞서 서술된 방법들에 의해 생성된 복소 홀로그램의 수치적 복원에 한정하여 그 방법들을 설명하고자 한다.

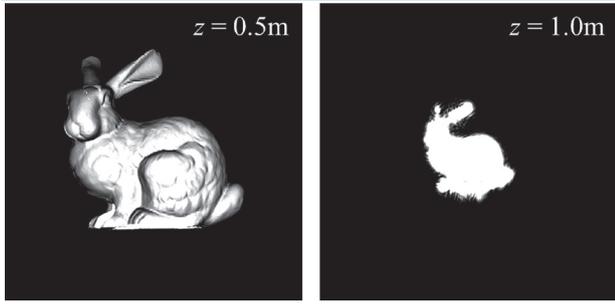


그림 6. 두 가지 거리에 대한 단일 프레넬 변환에 의한 수치적 복원 결과 (샘플링 간격의 차이에 의한 이미지 크기 차이 발생)

앞서 언급된 방법들로 생성된 복소 홀로그래프의 경우 해당 평면의 광파 분포와 동일하기 때문에, 2절에서 소개된 광파 회절식을 이용하여 수치 복원이 가능하다. 일반적으로 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식의 직접 계산은 가장 정확도가 높지만 비교적 많은 계산량이 요구되는 단점이 있다[30]. 프레넬 변환 회절식의 경우 계산 과정에서 FFT를 적용할 수 있어 계산 속도 면에서 장점이 있으나 근거리의 광파 회절에 대해서는 정확도가 떨어져 적용이 어렵다. 프레넬 회절 계산은 FFT 사용 횟수에 따라 두 가지 방법이 가능하다. 푸리에 도메인에서의 곱셈을 통한 합성곱 적분 계산(식(2))의 경우 최소 2번의 FFT가 사용되며, 적분 수식을 푸리에 변환의 형태(식(3))로 재 정리하여 계산하는 경우는 1번의 FFT가 사용된다.

주목할 만한 점은 1번의 FFT를 사용하는 단일 FFT 프레넬 회절 계산의 경우 진행 거리에 따라 복원 평면의 샘플링 간격이 변하게 된다는 것이다. <그림 6>에서 복원 거리가 달라짐에 따른 복원 이미지의 변화를 확인할 수 있다.

광파 분포를 평면파의 합으로 분해하여 광파 진행을 계산하는 각 스펙트럼 방법 또한 홀로그래프의 수치적 복원에 많이 사용된다. 수학적으로 각 스펙트럼의 표현식은 Rayleigh-Sommerfeld 적분식과 동일하며, 근사과정이 포함되지 않은 엄밀한 계산 방식이다. 평면상의 광파 분포에 대한 각 스펙트럼 계산은 2차원 푸리에 변환과 동일하므로 광파 진행 계산을 위해 FFT 계산이 요구된다. 이 방법은 근거리에서 정확도가 높은 반면 원거리에서는 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이는 각 스펙트럼 도메인의 광파 진행 계산 과정에서 사용되는 전달 함수(transfer function)의 불필요한 고주파수 성분에 의한 aliasing error에 기인한다. 이러한 샘플링 문제는 주파수 대역폭 제한(band-limitation)을 통해 불필요한 고주파수 성분을 제거함으로써 개선될 수 있으며, 이를 통해 원거리 회절 계산의 경우에도 각 스펙트럼 방법의 적용이 가능하다[31].

홀로그래프는 원리적으로 다양한 관찰 각도를 제공하지만 컴퓨터 생성 홀로그래프의 경우 관찰 각도는 이산적 특성 때문에 광파

의 최대 회절각도

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\Delta p} \right) \quad (11)$$

에 영향을 받는다. 최대 회절 각도를 넘지 않는 범위 내에서 시차에 의한 효과를 수치적 복원을 통해 확인 할 수 있다. 관찰 각도가 홀로그래프에 수직인 중심 축 상에서 벗어나는 경우, 해당 관찰 각도에서의 영상을 복원하기 위해선 좌표 변환에 대한 광파 진행 계산이 필요하다. 대표적인 것이 각 스펙트럼 기반 방법으로 각 스펙트럼의 값은 해당 방향으로 진행되는 평면파에 대한 정보를 담고 있으므로 각 스펙트럼 영역에서 회전 변환의 적용을 통해 광파 진행 계산이 가능하다(식(6)). 프레넬 회절 기반의 비축(off-axis) 기준 광파 진행 계산 방법 또한 제시된 바 있다[32][33].

IV. 결론

지금까지 가상의 객체에 대하여 컴퓨터 생성 홀로그래프를 생성하고 수치적으로 복원하는 기법에 대하여 알아보았다. 홀로그래프 생성에 필수적인 광파의 회절식과 이를 이용하여 홀로그래프 생성을 위한 전형적인 수치적 방법을 설명하였다. 이때 객체의 표현 방식에 따라 효과적인 생성 방법을 선택할 수 있음을 보았다. 또, 생성된 홀로그래프는 광학적 재생 과정 없이 수치적인 복원 과정을 통해 계산된 홀로그래프의 의도에 맞게 생성되었는지를 검증할 수 있음을 보았다. 컴퓨터 생성 홀로그래프의 생성, 복원 기법은 해당 수치적 알고리즘을 C++ 라이브러리로 형태로 개발하여 활용성을 높여가나[34], 나아가 디지털 홀로그래프의 저작, 편집 소프트웨어 개발을 위한 기반 기술로 활용할 수 있다(그림 7). 향후 컴퓨터 생성 홀로그래프는 기존의 컴퓨터 그래픽스 기술과의 접목을 통해 품질과 사실성이 극대화 되어 순수 광학 기술의 영역에서 디지털 홀로그래픽 콘텐츠 영역으로 발전하게 될 것으로 보인다.

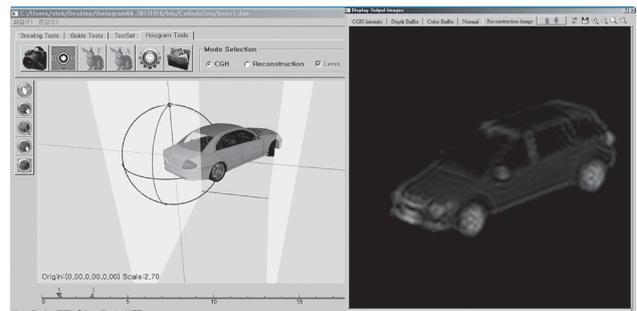


그림 7. 디지털 홀로그래프 저작 툴(ETRI, 2013)

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 '범부처 Giga KOREA 사업'의 일환으로 수행하였음.[GK13C0100, 기가급 대용량 양방향 실감 콘텐츠 기술 개발]

참고 문헌

- [1] B. Lee, "Three-dimensional displays, past and present," *Phys. Today* 66, 36–41 (2013).
- [2] D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature*, 161, 777 (1948).
- [3] E.N. Leith, and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects," *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 1295 (1964).
- [4] G. Saxby, *Practical Holography* (Prentice-Hall, 1988).
- [5] W.H. Lee, "Computer-generated holograms: Techniques and applications," *Progress in Optics*, 16, 121–232 (1978).
- [6] L.P. Yaroslavskii, and N.S. Merzlyakov, *Methods of digital holography* (Plenum, 1980).
- [7] A.D. Stein, Z. Wang, and J.S. Leigh Jr., "Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing," *Computers in Physics*, 4, 289–292 (1992).
- [8] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier optics* (Roberts & Company, 2005).
- [9] T. Tommasi, and B. Bianco, "Frequency analysis of light diffraction between rotated planes," *Opt. Lett.* 17, 556–558 (1992).
- [10] N. Delen, and B. Hooker, "Free-space beam propagation between arbitrarily oriented planes on full diffraction theory: a fast Fourier transform approach," *J. Opt. Soc. Am. A* 15, 857–867 (1998).
- [11] K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves," *J. Opt. Soc. Am. A* 20, 1755–1762 (2003).
- [12] M.E. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," *J. Electron. Imaging* 2, 21–34 (1993).
- [13] W. J. Plesniak, M. Halle, V. M. Bove, Jr., J. Barabas, and R. Pappu, "Reconfigurable image projection holograms," *Opt. Eng.* 45, 115801 (2006).
- [14] D. Voelz, *Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial* (SPIE Express, 2011).
- [15] R. H.-Y. Chen and T. D. Wilkinson, "Computer generated hologram from point cloud using graphics processor," *Appl. Opt.* 48, 6841–6850 (2009).
- [16] T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recoring plane," *Opt. Lett.* 34, 3133–3135 (2009).
- [17] T. Shimobaba, T. Ito, N. Msuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL," *Opt. Express* 18, 9955–9960 (2010).
- [18] S.-C. Kim and E.-S. Kim, "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method," *Appl. Opt.* 47, D55–D62 (2008).
- [19] Y. Pan, X. Xu, S. Solanki, X. Liang, R. Tanjung, C. Tan, and T.-C. Chong, "Fast CGH computation using S-LUT on GPU," *Opt. Express* 17, 18543–18555 (2009).
- [20] S.-C. Kim, J.-M. Kim, and E.-S. Kim, "Effective memory reduction of the novel look-up table with one-dimensional sub-principle fringe patterns in computer-generated holograms," *Opt. Express* 20, 12021–12034 (2012).
- [21] J. Jia, Y. Wang, J. Liu, X. Li, Y. Pan, Z. Sun, B. Zhang, Q. Zhao, and W. Jiang, "Reducing the memory usage for effective computer-generated hologram calculation using compressed look-up table in full-color holographic display," *Appl. Opt.* 52, 1404–1412 (2013).
- [22] L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor, and J. Watson, "Computer generated holograms from three dimensional meshes using an analytic light transport model," *Appl. Opt.* 47, 1567–1574 (2008).
- [23] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, "Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional

- surface objects for digital holography,"Appl. Opt. 47, D117-D127 (2008).
- [24] Y.-Z. Liu, J.-W. Dong, Y.-Y. Pu, B.-C. Chen, H.-X. He, and H.-Z. Wang, "High-speed full analytic holographic computations for true-life scenes,"Opt. Express 18, 3345-3351 (2010).
- [25] S. Trester, "Computer-simulated Fresnel holography,"Eur. J. Phys. 21, 317-331 (2000).
- [26] J. Leng, X. Sang, B. Yan, M. Zhang, and X. Cao, "A novel coding method for high vividness three-dimensional holographic display,"Optik 125, 724-726 (2014).
- [27] O. D. D. Soares and J. C. A. Fernandes, "Cylindrical hologram of 360° field of view," Appl. Opt. 21, 3194-3196 (1982).
- [28] Y. Sando, M. Itoh, and T. Yatagai, "Fast calculation method for cylindrical computer-generated holograms," Opt. Express 13, 1418-1423 (2005).
- [29] M. L. Tachiki, Y. Sando, M. Itoh and T. Yatagai, "Fast calculation method for spherical computer-generated holograms," Appl. Opt. 45, 3527-3533 (2006).
- [30] F. Shen and A. Wang, "Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula," Appl. Opt. 45, 1102-1110 (2006).
- [31] K. Matsushima and T. Shimobaba, "Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of freespace propagation in far and near fields," Opt. Express 17, 19662-19673 (2009).
- [32] L. Yu, Y. An and L. Cai, "Numerical reconstruction of digital holograms with variable viewing angles," Opt. Express 10, 1250-1257 (2002).
- [33] K. Yamamoto, Y. Ichihashi, T. Senoh, R. Oi, T. Kurita "Calculating the Fresnel diffraction of light from a shifted and tilted plane," Opt. Express 20, 12949-12958 (2012)
- [34] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, and T. Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library,"Comp. Physics. Comm. 183, 1124-1138 (2012)

약 력



오 승 택

1994년 KAIST 수학과 학사
1996년 KAIST 수학과 석사
2004년 KAIST 수학과 박사
2004년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
관심분야: 컴퓨터 생성 홀로그램, 컴퓨터그래픽스, 수치 시뮬레이션



황 치 영

2010년 서울대학교 전기공학부 학사
2012년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사
2012년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 근무
관심분야: 회절 광학 이론, 비회절 빔



이 범 렬

1987년 전북대학교 전자공학과 졸업
1989년 전북대학교 석사 전자공학전공
2013년 군산대학교 박사 전자정보공학전공
1989년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원
관심분야: 초다시점 영상 획득 및 디스플레이, 디지털 홀로그래픽 콘텐츠, 가상세계기술 등



정 일 권

1992년 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
1994년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
1999년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
1999년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원
관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 실감 콘텐츠, 가상 현실