컴퓨터 생성 홀로그래피의 GPU 기반 가속화 이슈 및 전망

□ 신승협 / 한국전자통신연구원

요약

컴퓨터 생성 홀로그래피(CGH)는 광파의 진행을 수치적으로 시뮬레이션하여 홀로그램 영상을 합성하는 연구분야이다. 실물 기반 홀로그램으로는 제작하기 어려운 다양한 가상 장면을 다룰 수 있으며 복잡한 광학계 구축 문제로부터 자유로운 장점 등으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 대규모 병렬 처리가 가능한 범용 GPU의 발전은 CGH 실용화의 견인차가 되고 있다. 본 고에서는 CGH의 원리 소개와 함께 GPU에 기반한 CGH 고속화의 이슈 및 향후 전망을 살펴보고자 한다.

I. 서 론

홀로그래피는 빛의 분포를 간섭 무늬의 형태로 저장하고 그로부터 진폭과 위상을 재생하는 광학 기술을 총칭한다. 대상 장면의 3차원 정보를 온전히 표현하지 못하는 기존 영상 기술과 달리 홀로그래피는 진폭과 위상의 복원을 통해 실제와 구분하기 어려운 수준의 영상을 제공하는 궁극의 디스플레이 기술로 여겨지고 있다. 1947년 Gabor가 최초로 홀로그래피의 원리를 제시한 이후, 홀로그래피 연구는 레이저 등의 가간섭성 광원을 물체에 조사하여 얻은 프린지 패턴(fringe pattern)을 필름에 기록하고 이를 다시 재생하는 아날로그 홀로그래피 분야에 주로 집중되어 왔다. 한편 컴퓨터의 성능이 비약적으로 발전하면서 파동의 진행을 수치적으로 시뮬레이션하여 홀로그램을 생성하는 컴퓨터 생성 홀로그래피(Computer-Generated Holography; CGH) 기술이 대두되었다. CGH는 기존 실물 기반의 홀로그램으로는 표현하기 어려운 가상의 장면을 자유롭게 다룰 수 있다는 특징을 가지며 방대한 양의 파동 진행 계산을 효율적으로 수행할 수 있는 알

※ 본 고는 과학기술정보통신부 '범부처 Giga KOREA 사업'의 지원을 받아 작성하였음. [GK19D0100, 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발]

고리즘과 병렬처리 하드웨어가 지속적으로 등장하면서 더욱 주목받고 있다.

본 고는 GPU에 기반한 CGH 고속 생성 방법을 소개하고 향후 전망을 살펴본다. 우선 Ⅱ장에서 파동 진행의 기본 원리와 대표적인 CGH 기술을 소개한다. Ⅲ장에서는 GPU를 이용한 CGH 고속화의 다양한 이슈와 앞으로의 발전 방향을 조감한 후 Ⅳ장에서 결론을 맺고자 한다.

Ⅱ. 광파 진행 모델과 CGH의 개요

광파의 진행을 수치적으로 계산하기 위해서는 광파 회절의 물리적 모델을 수학적으로 표현해야 한다. 본 장에서는 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식과 그로부터 유도되는 광파 진행식을 설명한 후, 대표적인 CGH 생성 기법들을 3차원 물체의 자료 구조 표현 방식에 따라 나누어 소개한다.

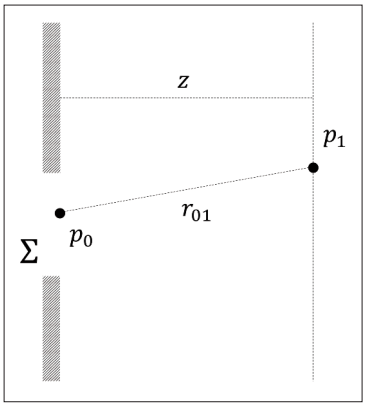
1. 광파 진행 모델

〈그림 1〉은 개구(aperture) Σ에 분포된 광파 $\widetilde{u_0}$가 퍼져나가는 경우를 나타낸다. 스칼라 회절 이론(scalar diffraction theory)에 의하면 임의의 위치 p_1에서의 파장 분포 $\widetilde{u}$는 다음과 같은 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식을 통하여 얻을 수 있다[3, 6].

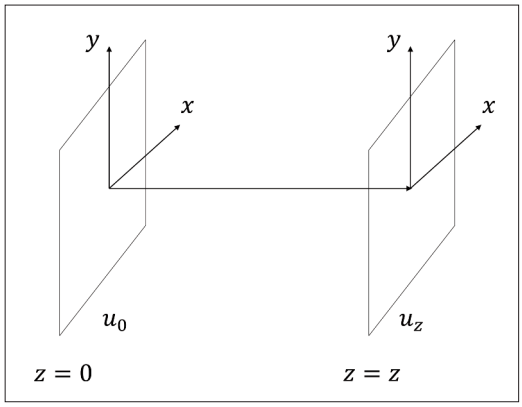
$$\tilde{u}(\boldsymbol{p}_1) = \frac{1}{i\lambda}\iint_{\Sigma} \widetilde{u_0}(\boldsymbol{p}_0)\frac{e^{ikr_{01}}}{r_{01}}\frac{z}{r_{01}}\mathrm{ds}$$

이때 z는 p_1에서 개구 평면까지의 수직 거리, r_{01}은 p_0에서 p_1까지의 거리, λ는 파장(wavelength), k(=2π/λ)는 파동수(wave number)를 의미한다.

Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식을 이용하면 평행한 두 평면 간의 광파 진행을 계산할 수 있다. 하지만 평면 위의 모든 샘플링 위치에 대하여 각각 적분을 수행하는데 필요한 계산량이 지나치게 많다는 문제가 발생한다. 이때 각 스펙트럼(angular spectrum)을 활용하여 적분식을 재구성함으로써 효율적인 계산이 가능해진다. 〈그림 2〉와 같이 평면 z=0에 정의된 파동장(wavefield) u_0이 z 만큼 진행했을 때의 파동장 u_z을 구하는 경우를 생각해 보자. Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식은 푸리에 변환(Fourier transform)과 전달함수(transfer function)를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.



〈그림 1〉 개구를 통한 광파의 회절



〈그림 2〉 평행한 두 평면 간의 광파 진행

$$u_z(x,y,z) = \mathcal{F}^{-1}\left(\mathcal{F}\left(u_0(x,y,0)\right)H(f_x,f_y)\right)$$

$\mathcal{F}$는 푸리에 변환,
$H(f_x,f_y) = \exp\left(i2\pi z\sqrt{1/\lambda^2 - (f_x^2+f_y^2)}\right)$는 전달함수이다. 이때 $\mathcal{F}(u_0(x,y,0))$를 u_0의 각 스펙트럼이라고 부르며 각각의 푸리에 계수는 특정 방향으로 진행하는 평면파를 나타낸다.

두 평면의 거리가 충분히 떨어져 있는 경우 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분식을 근사하여 더욱 효율적으로 계산을 수행할 수 있다. 다음의 프레넬 근사(Fresnel approximation)는 한 번의 푸리에 변환만을 포함한다[3].

$$u_z(x,y,z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z}\exp\left(ik\frac{x^2+y^2}{2z}\right)\mathcal{F}\left(u_0(\xi,\eta,0)\right)$$

파동장의 샘플링 지점이 n개일 때, 각 스펙트럼 방법과 프레넬 근사는 모두 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT)을 통하여 O(n log n)의 복잡도로 빠르게 계산될 수 있다.

2. 대표적인 CGH 알고리즘

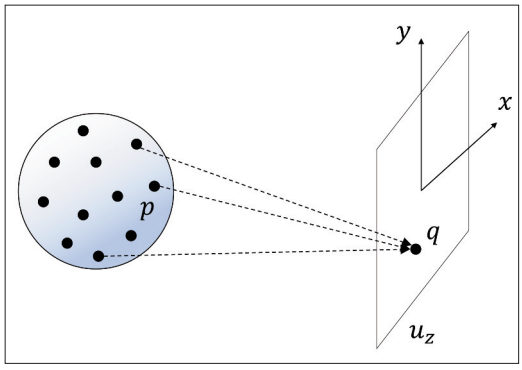
Ⅱ-1절의 광파 진행 모델을 바탕으로 3차원 물체의 CGH를 생성하는 다양한 방법이 제시되어 왔다. 본 절에서는 세 가지의 기본적인 CGH 생성 방식을 살펴본다.

1) 점 기반 CGH(Point-based CGH)

점 기반 CGH 기법은 3차원 물체의 표면 정보 또는 밀도 정보를 무한히 작은 점들의 집합(point cloud)으로 표현하고 각 점을 독립적인 점광원으로 활용하여 홀로그램을 생성하는 방법으로, 직관적이며 Rayleigh-Sommerfeld 적분식을 그대로 활용할 수 있는 장점으로 인해 CGH 생성의 가장 기초적인 방식으로 쓰이고 있다. n개의 점광원이 주어지고 각 광원은 모든 방향에 대하여 같은 세기로 퍼져나가는 무지향성 광원(omnidirectional light)이라고 가정할 때(〈그림 3〉), 파동장 u_z는 다음과 같이 파동의 중첩으로 계산할 수 있다[1].

$$u_z(x_q,y_q,z_q) = \sum_p^n A_p\frac{\exp(ikr_{pq})}{r_{pq}}$$

이때 A_p는 점광원 p의 초기 복소 진폭을, r_{pq}는 점광원 p와 파동장의 샘플링 지점 q 간의 거리를 의미한다. 최근에는 다양한 표면 반사 모델을 반영한 비등방성 광원(anisotropic light)의 표현 방법이나 물체들의 상대적 위치에 의한 빛의 가려짐(occlusion)을 처리할 수 있는 확장된 점 기반 CGH 방법들도 지속적으로 제안되고 있다.



〈그림 3〉 점 기반 CGH 생성

2) 레이어 기반 CGH(Layer-based CGH)

3차원 물체와 홀로그램을 생성할 파동장 평면의 거리가 충분히 먼 경우, 물체의 깊이 정보를 몇 단계로 양자화함으로써 빠르게 CGH를 생성할 수 있다. 〈그림 4〉와 같이 대상 물체의 정보를 홀로그램

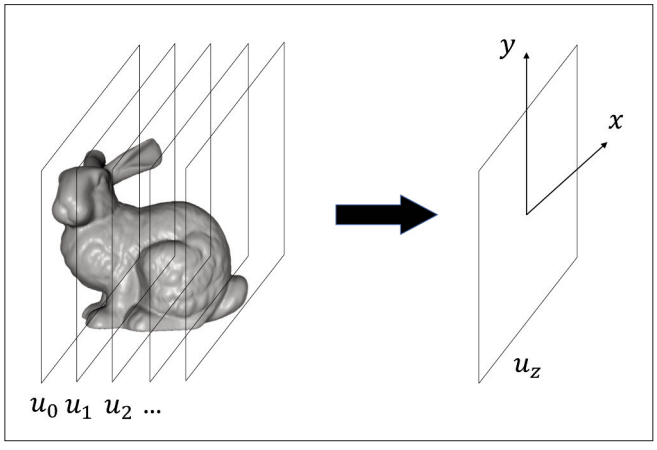
평면에 평행한 여러 레이어에 샘플링하여 재구성하면 각 층의 광파 진행은 Ⅱ-1절에서 소개한 평면 간 광파 진행 모델을 통하여 효율적으로 수행할 수 있다. 이렇게 홀로그램 평면으로 진행된 각 파동장을 중첩함으로써 최종적인 파동장을 얻게 된다. 3차원 물체를 레이어의 집합으로 근사하기 위해서는 물체의 표면 정보를 가까운 레이어에 투영하거나 또는 전통적인 그래픽스 파이프라인을 통하여 RGBD(RGB+Depth) 영상을 직접 생성할 수도 있다. 최근 Microsoft Kinect, Intel RealSense 등 다양한 방식의 깊이 센서가 상용화되면서 실사 장면에 대한 RGBD 정보의 획득도 일반화되는 추세이다.

3) 메쉬 기반 CGH(Mesh-based CGH)

다각형 메쉬(polygonal mesh)는 3차원 물체의 표면 형태를 표현하기 위해 널리 사용되는 자료구조이다. 물체의 표면을 유한한 개수의 서로 연결된 평면 다각형으로 나타냄으로써 적은 양의 정보로 형태를 근사할 수 있다는 장점을 가진다. 메쉬 기반 CGH 기법은 일반적으로 각 평면 다각형이 삼각형으로 구성되는 삼각형 메쉬(triangular mesh) 구조를 활용한다. 각각의 삼각형은 평면 위에 정의된 개구(aperture)로 볼 수 있으므로 기울어진 평면의 광파 진행 모델을 적용하여 홀로그램을 생성할 수 있다. 이처럼 삼각형 평면이 홀로그램 평면과 평행하지 않을 경우 Ⅱ-1절에서 소개한 각 스펙트럼 기반 파동장 진행식에 회전항을 추가하여 계산 가능하다[1,4].

Ⅲ. GPU 기반 CGH 고속화와 향후 전망

광파 진행 모델에서 볼 수 있는 것처럼 CGH 계산은 주로 대량의 대상 데이터에 대하여 유사한 연산을 반복적으로 수행하는 형태로 이루어진다. 이러한 성격의 문제는 최근 많은 관심을 받고 있는 GPU를 포함한 멀티코어 연산장치에서 수행하기에 매우 적합한 것으로 알려져 있다. 본 장에서는 GPU 기반의 CGH 고속 생성 시 고려할 이슈를 살펴보고 향후 전망에 대하여 논의한다.



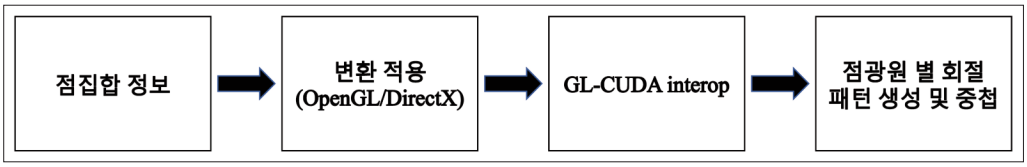
〈그림 4〉 레이어 기반 CGH 생성

1. GPU 기반 CGH 알고리즘 가속화의 이슈

범용 프로그래밍을 위하여 설계된 CPU와 달리, GPU(Graphics Processing Unit)는 영상의 픽셀 값을 대량으로 빠르게 결정하기 위하여 수치 연산 성능과 코어의 개수를 극단적으로 높이고 기타 성능의 비중은 상대적으로 낮춘 구조를 가진다. 최근의 하이엔드 GPU는 약 5,000개 수준의 연산 코어를 탑재하고 있으며 일반적으로 SIMD(Single Instruction Multiple Data) 구조에 기반하고 있다. 이러한 특징은 동일한 수식을 데이터만 달리하여 처리하는 경우가 잦은 CGH 계산을 효율적으로 수행할 수 있음을 의미한다[2,5].

GPU는 정점(vertex)의 좌표계 변환, 물체의 음영 계산(shading) 등 그래픽스 파이프라인에서 수행되는 연산들을 고속 수행하는데 특화된 하드웨어로서 처음 등장했다. 이후 GPU의 병렬, 고속 연산 능력을 범용 연산에 활용하려는 시도가 계속되면서, 칩 제조업체들은 GPU의 개념을 GPGPU (General-Purpose GPU)로 확장하고 그에 기반한 새로운 형태의 병렬 컴퓨팅 플랫폼을 제안하기에 이르렀다. 대표적인 것이 오픈 프레임웍인 OpenCL(Open Computing Language)과 NVIDIA 하드웨어 전용의 CUDA(Compute Unified Device Architecture)이다. OpenCL은 다양한 하드웨어를 지원한다는 장점이 있으나 CUDA에 비해 프로그래밍 난이도가 높고, 저수준 API를 통하여 하드웨어에 직접 접근할 수 있는 여지가 적어 성능이 떨어질 수 있다고 알려져 있다. CUDA는 특정 회사의 제품군에서만 실행 가능하다는 단점에도 불구하고 뛰어난 성능, 사용의 편의성, 지원 소프트웨어 라이브러리의 방대함에 힘입어 넓은 사용자 저변을 갖고 있다. 한편 범용 연산 라이브러리 대신 GLSL (Graphics Library Shading Language), HLSL(High Level Shading Language)과 같은 쉐이딩 언어를 사용하여 컴퓨터 그래픽스 파이프라인을 직접 활용할 수도 있다. 쉐이딩 언어는 물체 표면의 음영을 계산하기 위해 만들어진 고수준의 프로그래밍 언어로서 CUDA와 같은 범용성은 제공하지 않는 반면 OpenGL이나 DirectX 등의 그래픽스 라이브러리와 직접적인 연동이 용이하다는 장점을 갖는다. 본 고에서는 GPU 기반 CGH 고속화에 가장 널리 사용되고 있는 CUDA를 기준으로 논의를 진행하나, 대부분의 설명은 다른 라이브러리의 경우에도 유사하게 적용된다.

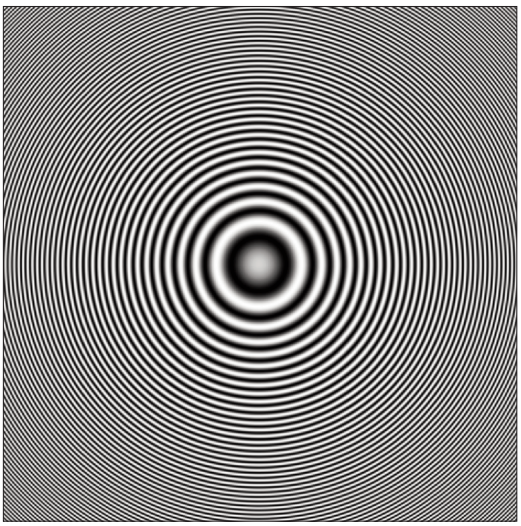
〈그림 5〉의 예제는 그래픽스 라이브러리와 CUDA를 연동하여 점 기반 CGH를 생성하는 과정이다. 우선 그래픽스 라이브러리를 통하여 이동, 회전 등의 좌표 변환을 거친 점 집합 정보를 CUDA에서 접근할 수 있는 형태로 변환한다(graphics library-CUDA interop). 개별 점광원에서 발산되는 구면파는 홀로그램 평면에 〈그림 6〉과 같은 회



〈그림 5〉 CG 연동 고속 점집합 기반 CGH 생성

절 패턴을 생성하게 된다. 홀로그램 평면의 각 픽셀마다 하나의 GPU 스레드를 할당하고 병렬 수행함으로써 하나의 점광원에 대한 홀로그램을 고속으로 계산할 수 있다. 마지막으로, 이렇게 얻어진 개별 홀로그램을 중첩하면 모든 점광원을 반영한 최종 홀로그램을 얻게 된다.

레이어 기반 CGH 알고리즘의 경우 대부분의 시간은 각 레이어 별 FFT 계산에서 소요되며, 이는 GPU 기반 병렬화의 효과를 크게 얻을 수 있는 예 중 하나이다. CUDA는 FFT 계산을 위한 라이브러리인 cuFFT를 공식적으로 제공하고 있다. cuFFT는 다양한 세대의 GPU 하드웨어에 최적화되어 있으며 CPU 기반 FFT 라이브러리로 잘 알려진 FFTW(Fastest Fourier Transform in the West)와 유사한 함수 호출 인터페이스를 제공하여 기존 코드를 적은 비용으로 포팅할 수 있도록 지원한다. 파동장을 홀로그램 평면으로 진행시키는 과정은 각 레이어 별로 독립적으로 수행 가능하다. 이는 파동장 진행을 위한 CUDA 커널 함수를 레이어 순서에 따라 순차적으로 호출할 필요가 없음을 의미한다. 이러한 경우 커널 함수를 비동기식으로 호출(asynchronous kernel call)하여 레이어 별 데이터 이동에 의한 오버헤드를 최소화함으로써 성능을 추가로 향상시킬 수 있다. 이러한 비동기식 CUDA 커널 호출의 이점은 각 삼각형을 독립적으로 처리할 수 있는 메쉬 기반 CGH 생성 기법에서도 활용 가능하다.



〈그림 6〉 렌즈 위상 함수(Lens phase function)

2. GPU 기반 CGH 기법의 향후 전망

NVIDIA와 AMD에 의하면 GPU의 처리 속도 향상율은 향후 10년 동안 연 150% 이상의 수준으로 유지될 수 있을 것으로 보인다. CGH 분야의 발전이라는 관점에서 보면 이는 방대한 계산량의 문제로 인하여 시도하기 어려웠던 다양한 홀로그램 생성 방법을 실용화할 수 있게 된다는 것을 의미한다. 본 고에서 소개한 기본적인 CGH 생성 기법들은 단순한 표면 반사 모델만을 지원하거나, 물체 간의 가림(occlusion)을 고려하지 않거나, 좁은 시야각을 가정하는 등의 한계를 가지고 있다. 하지만 GPU 성능의 비약적인 발전은 CGH 고속화 알고리즘의 지속적인 연구와 함께 이러한 한계를 점차 극복하는 견인차가 되고 있다. 예를 들어 다양한 연구진에서 시도되고 있는 라이트필드(lightfield) 기반 CGH의 경우 그래픽스 분야에서 발전되어 온 다양한 쉐이딩 기법을 활용할 수 있고 물체 가림 문제 또한 다룰 수 있다는 장점을 가진다.

GPU의 연산 성능 향상 뿐 아니라 새로운 기능의 추가 또한 CGH 연구의 돌파구를 제공할 것으로 보인다. 최근 NVIDIA 에서 발표한 RT(Ray Tracing) 코어와 DirectX12 확장버전에서 제공될 예정인

DXR(DirectX Raytracing)은 하드웨어 수준에서 실시간 레이트레이싱을 지원하는 기능으로서, 물체 가림 문제를 고속으로 계산할 수 있을 뿐 아니라 대부분 표면 반사 표현에 국한되었던 CGH의 영역을 넓힐 수 있을 것으로 예상된다. 또한 딥러닝 응용 분야에서의 고속 행렬 계산을 위해 만들어진 NVIDIA의 텐서코어(tensor core)는 범용 부동소수점 연산 코어에 비해 10배 이상의 성능(약 120 Teraflops)을 가지고 있어 최근 활발하게 연구되고 있는 딥러닝 기반 CGH에서의 활용이 기대된다.

IV. 결 론

본 고에서는 컴퓨터 생성 홀로그래피의 기본 원리와 GPU 기반 가속 방법을 살펴보았다. 홀로그램을 수치적으로 생성하기 위해서는 대규모의 연산이 요구되며, 광파 진행 모델의 특성상 GPU와 같은 대규모 병렬 처리 하드웨어 기반의 계산이 매우 효율적임을 보여주었다. GPU 성능의 비약적인 발전은 인터랙티브 CGH 시스템과 같은 새로운 응용 분야를 열 수 있으며, 하드웨어 기반 레이트레이싱이나 딥러닝용 고속 연산 코어의 추가 또한 CGH의 고품질화 및 고속화에 기여할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] 오승택, 황치영, 이범렬, 정일권, 디지털 홀로그래픽 콘텐츠 생성 및 복원 기술, 한국통신학회, 한국통신학회지(정보와통신) 31(3), 2014.2, 39-45

[2] 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”, Computer Physics Communications, 183, 1124-1138 (2012)

[3] M. Janda, Digital hologram synthesis, technical report, No. DCSE/TR-2007-02, University of West Bohemia, 2007

[4] J.H. Park, Recent progress in computer-generated holography for three-dimensional scenes, Journal of Information Display, 18:1, 1-12, 2017

[5] Tomoyoshi Shimobaba and Tomoyoshi Ito, Computer Holography-Acceleration algorithms and hardware implementations, CRC press, 2019

[6] J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 4th edition, 2017

필 자 소 개

신 승 협

– 1998년 : 연세대학교 컴퓨터과학과 학사
– 2000년 : KAIST 전산학과 석사
– 2006년 : KAIST 전산학과 박사
– 2006년 ~ : 한국전자통신연구원 책임연구원
– 주관심분야 : 디지털 홀로그래피, 물리 기반 시뮬레이션 및 렌더링, 다시점 디스플레이