

새로운 룩업테이블을 이용한 3차원 디지털 홀로그램의 고속 합성 및 복원

정회원 김 승 철*, 종신회원 김 은 수*

Fast Generation and Reconstruction of Digital Holograms Using a Novel Look-up Table

Seung-Chul Kim* *Regular Member*, Eun-Soo Kim* *Lifelong Member*

요 약

3차원 물체에 대한 디지털 홀로그램을 합성할 때 사용되는 기존의 LT(look-up table) 방식은 고속연산은 가능하나 과도한 데이터 저장 공간을 요구하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 LT 방식의 연산속도는 그대로 유지하면서도 데이터 저장용량을 획기적으로 줄여줄 수 있는 새로운 룩업테이블 방식인 N-LT(novel look-up table) 제시하였다. 즉, 제안된 방식에서는 기존 LT 방식에서와 같이 3차원 물체의 모든 방향의 포인트가 아닌 각 깊이 방향의 포인트에 대한 요소 프린지 패턴만을 저장하고, 그 깊이 평면에 존재하는 포인트들의 프린지 패턴은 요소 프린지 패턴을 이동시켜 계산하게 된다. 실험 결과 제안된 N-LT 방식은 기존의 광선추적(ray-tracing) 방식에 비해 48.7배의 속도향상을 갖고, 기존의 LT 방식에 비해 1/217 정도의 데이터 공간이 필요함이 분석되었다.

Key Words : 3D Display, Holography, CGH(Computer Generated Holography), Look-up Table

ABSTRACT

Conventional look-up table(LT) has gained a lot of speed increase in generation of digital holograms for 3D objects, but it has required an enormous memory size of the LT. In this paper, a novel approach to dramatically reduce the size of the conventional LT, still keeping its advantage of fast computational speed is proposed, which is called here a N-LT(novel look-up table) method. In the proposed method, only the fringe patterns of the center points on each image plane are pre-calculated, called elemental fringe patterns and stored in the look-up table. Then, the fringe patterns for other object points on each image plane can be obtained by simply shifting this pre-calculated elemental fringe pattern according to the displaced values from the center to those points and adding them together. Some experimental results revealed that the computational speed and the required memory size of the proposed approach are found to be 48.7 times faster than that of the ray-tracing method and 217 times smaller than that of the conventional LT method, respectively.

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업 (IITA-2008-C1090-0801-0018) 및 광운대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

* 광운대학교 전자공학과 차세대 3D 디스플레이 연구센터({sckim, eskim}@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-01-014, 접수일자 : 2008년 1월 8일, 최종논문접수일자 : 2008년 3월 11일

I. 서 론

3차원 입체영상 기술은 향후 기존의 2차원 디지털 방송, 통신을 대신할 수 있는 차세대 실감 영상 미디어로 기대되고 있다. 또한, 원격의료, 가상현실, 영화, 게임 산업 등에서도 큰 영역을 크게 차지할 것으로 예상되고 있다.

그동안 다양한 방법의 3차원 영상 디스플레이 방식이 제안되거나 실제로 여러 응용에서 활용되고 있다^[1]. 특히, 홀로그래피 기술은 원리적으로 완전 3차원 입체영상 기술이기 때문에 개발 초부터 3차원 디스플레이 기술로 활용하기 위한 많은 연구가 이루어졌으나 여러 가지 현실적인 문제로 그 응용이 실질적으로 제한되어 왔다^[2]. 즉, 기존의 광 홀로그램(optical hologram)은 가 간섭성 광인 레이저 광을 사용하여 만들어지기 때문에 실험공간이 암실로 제한되고, 진폭과 위상정보를 저장하기 위한 과정에서는 작은 움직임에도 간섭무늬가 파괴될 수 있기 때문에 매우 안정적인 광학 시스템이 요구된다. 이러한 문제를 해결하는 새로운 접근방법으로 컴퓨터를 이용하여 홀로그램 패턴을 생성하는 컴퓨터 형성 홀로그램(CGH: computer-generated hologram) 즉, 디지털 홀로그램(digital hologram) 기법이 제안되었다^[3].

일반적으로 임의 물체에 대한 디지털 홀로그램 패턴을 계산할 때 빛의 회절을 계산하는 광선추적(ray-tracing) 방식이 주로 사용되어 왔다. 이 방식에서는 물체를 점들의 집합으로 보고 각각의 물체 점들에 대한 홀로그램 패턴을 모두 계산하여 합산하게 된다. 따라서 이 방법은 과도한 계산량이 요구되기 때문에 복잡한 물체에 대한 실시간적 홀로그램 합성을 어렵게 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 룩업테이블(LT: look-up table)을 이용한 새로운 디지털 홀로그램 계산 방법이 제안되었다^[4]. 이 방법은 모든 가능한 물체 포인트에 대한 요소 프린지 패턴(EFP: elemental fringe pattern)을 미리 계산하여 데이터 베이스(data base)로 저장하게 된다. 따라서 임의 물체에 대한 홀로그램 계산은 그 물체를 구성하고 있는 각 포인트에 대한 요소 프린지 패턴들을 이미 계산하여 저장해 놓은 데이터 베이스에서 단순히 불러내어 합산함으로써 구하게 된다. 이러한 룩업테이블 방식은 광선추적 방식에 비해 계산량이 크게 감소하여 디지털 홀로그램의 고속 생성이 가능하다. 하지만 이 방법은 물체영역이 커질수록 필요로 하는 EFP의 개수가 크게 늘어나게 되고, 결국은 룩업

테이블의 메모리 용량이 크게 증가하게 되는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 LT 방식과 같이 고속의 홀로그램 계산 속도는 그대로 유지하면서도 룩업테이블의 메모리 용량을 획기적으로 줄일 수 있는 새로운 룩업테이블인 N-LT(novel look-up table)을 제시하고 이를 이용한 새로운 디지털 홀로그램 고속생성 기법을 제시하고자 한다. 즉, 새로이 제안하는 N-LT 방식에서는 물체영역의 가로, 세로 방향에 관계없이 깊이 방향에 대한 각각의 요소 프린지 패턴만을 사전에 미리 계산하여 저장된다. 그리고 물체의 한 깊이 방향이 결정되면 그 면에 존재하는 물체 포인트들의 요소 프린지 패턴은 사전에 계산되어 저장된 그 깊이의 요소 프린지 패턴을 각 해당 포인트까지 좌, 우로 이동시키며 모든 포인트에 대한 프린지 패턴을 합산하여 그 깊이의 홀로그램 패턴을 계산하게 된다. 같은 방법으로 모든 물체 깊이 방향에서 각 물체 포인트에 대한 모든 홀로그램을 계산하여 합산함으로써 물체 전체에 대한 홀로그램 패턴을 계산하게 된다. 따라서 기존 LT 방식은 가로, 세로, 깊이 모든 방향의 물체 포인트에 대한 요소 프린지 패턴의 사전 저장이 요구되나, 제안된 방식에서는 단지 물체 깊이 방향에 대한 프린지 패턴만의 사전 저장이 요구되기 때문에 룩업테이블 메모리 용량이 크게 줄어들게 된다.

따라서 본 논문에서 새로이 제안하는 디지털 홀로그램 합성 방법의 실제 응용 가능성을 검증하기 위하여 ‘자동차’ 테스트 영상을 사용하여 실험하고 그 결과를 분석하였다. 즉, 기존의 광선 추적 방식, LT 방식과 본 논문에서 새로이 제안된 N-LT 방식을 이용하여 ‘자동차’ 물체영상에 대한 디지털 홀로그램을 각각 합성하고, 각 방식에서 요구되는 홀로그램 생성시간, 룩업테이블 메모리 용량 등을 비교 분석하였다.

II. 기존의 광선추적 및 룩업테이블 방식

2.1 기존의 광선추적 방식

디지털 홀로그램 패턴은 픽셀들의 좌표 값과 세기 값에 의해 컴퓨터 계산으로 생성된다. 즉, 디지털 홀로그램 패턴을 생성하는 기하학적 구조는 그림 1과 같으며^[5], 그림 1에서 홀로그램은 $z=0$ 인 $x-y$ 평면에 위치하고, 물체의 p 번째 점은 (x_p, y_p, z_p) 에 위치하고 a_p 의 세기값과 ϕ_p 의 위상값를 갖는다고 가정한다.

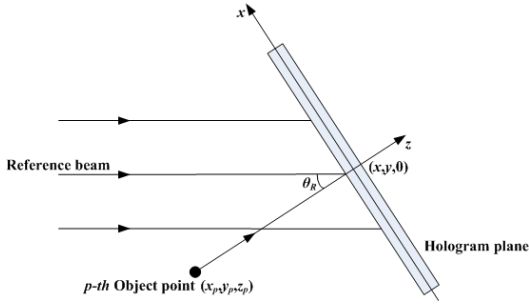


그림 1. 프레넬 홀로그래프의 기하학적 계산

이 때, 홀로그래프에서 복소 진폭 $O(x, y)$ 는 식 (1)에서 나타난 것처럼 물체파의 중첩으로 구할 수 있다.

$$O(x, y) = \sum_{p=1}^N \frac{a_p}{r_p} \exp[j(kr_p + \phi_p)] \quad (1)$$

여기서 N , a_p 는 물체를 구성하는 점들의 수와 물체파의 세기를 각각 나타내고, 파수(wave number) 벡터 k 는 $k = 2\pi/\lambda$ 로 정의되며 λ 는 자유공간상에서의 빛의 파장을 나타낸다. 편의상 $\exp(j\omega t)$ 는 식 (1)에서 포함시키지 않았다. 홀로그래프에서 p 번째 물체점과 $(x, y, 0)$ 사이의 거리 r 은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$r_p = \sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + z_p^2} \quad (2)$$

또한, 평면파인 기준파의 복소 진폭 $R(x, y)$ 는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$R(x, y) = a_R \exp[j(-kx \sin \theta_R)] \quad (3)$$

여기서 a_R 과 θ_R 은 기준파의 세기와 입사각을 각각 나타낸다. 홀로그래프 면에서의 전체적인 격자 세기는 식 (4)과 같이 물체파 $O(x, y)$ 와 기준파 $R(x, y)$ 사이의 간섭패턴으로 주어진다.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 \quad (4) \\ &= |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 \\ &\quad + 2|R(x, y)||O(x, y)| \cos [kr_p + kx \sin \theta_R + \phi_p] \end{aligned}$$

식 (4)에서 첫 번째와 두 번째 항은 물체파와 기준파의 세기를 각각 나타내며, 세 번째 항은 홀로그래프 정보를 부분적으로 포함하고 있는 물체파와 기준파 사이의 간섭 패턴을 의미한다. 식 (5)에서 홀로그래프

정보는 오직 세 번째 항에만 포함되어 있기 때문에 홀로그래프 패턴 $I(x, y)$ 는 최종적으로 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$I(x, y) = 2 \sum_{p=1}^N \frac{a_p}{r_p} \cos(kr_p + kx \sin \theta_R + \phi_p) \quad (5)$$

2.2 기존의 LT 방식

디지털 홀로그래프의 연산속도를 향상시키기 위한 새로운 접근방법으로 록업테이블(LT) 방식이 M. Lucent에 의해 제안되었다⁴¹. 이 방식은 가능한 물체영상 공간 내의 모든 점 (x_p, y_p, z_p) 에 대하여 기준 세기의 요소 프린지 패턴 $I(x, y)$ 를 미리 계산하여 테이블로 만들어 놓은 후에, 물체에 따라 필요한 포인트에 대한 요소 프린지 패턴을 불러내어 사용하는 방식이다.

일반적으로 실세계의 공간은 연속적이다. 따라서 실세계의 공간은 무한한 점을 갖게 되고 록업테이블을 이용해 홀로그래프를 만들기 위해서는 무한개의 요소 프린지 패턴이 필요하게 된다. 하지만 인간의 시각 시스템의 능력은 제한되어 있기 때문에 물체 점들을 이산화 하여 홀로그래프를 합성하여도 물체 영상의 해상도 저하 없이 영상을 재생할 수 있게 된다. 이때 이산화(discretization) 정도는 사람의 눈에 인지되지 않을 정도로 충분히 작아 연속적인 두 개의 점이 떨어져 있지 않고 연속적인 점으로 인식될 수 있어야 한다. 예를 들면, 인간은 3 milliradian의 간격을 갖는 두 점을 하나의 점으로 인식하게 된다. 따라서 500 mm의 거리에서 물체영상을 바라보는 경우는 $500 \text{ mm} \times 0.003 = 150 \text{ microns}$ 이하의 간격의 점을 하나의 점으로 인식하게 됨으로 본 논문에서는 수직, 수평의 이산화 정도를 150 micron으로 사용하였다.⁴¹

LT 방식의 요소 프린지 패턴은 식 (5)로부터 생성해 낼 수 있다. 즉, 기준 세기를 갖는 요소 프린지 패턴 $T(x, y; x_p, y_p, z_p)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T(x, y; x_p, y_p, z_p) = \frac{1}{r_p} \cos [kr_p + kx \sin \theta_R + \phi_p] \quad (6)$$

여기서, r_p 는 p 번째 점과 $(x, y, 0)$ 사이의 거리로 식 (2)와 같이 주어진다.

이 방식에서는 홀로그래프를 계산할 때 식 (5)와 같이 각 점에 대한 프린지 패턴을 필요할 때마다 계산하는 것이 아니라 미리 만들어놓은 각 점 (x_p, y_p, z_p)

에 대한 프린지 패턴의 집합인 룩업테이블을 이용하여 계산을 하게 된다. 따라서 LT 방식에서 홀로그램 정보 $I(x,y)$ 는 최종적으로 식 (7)과 같이 주어지며, 식에서 N 은 물체 포인트 수를 나타낸다.

$$I(x,y) = \sum_{p=1}^N a_p I(x,y; x_p, y_p, z_p) \quad (7)$$

홀로그래에서 위상(ϕ_p)은 이미지의 포인트 간의 상호작용을 나타내는 중요한 요소이다. 그러나 위상 성분은 사람의 눈으로는 볼 수 없고, 또한 두 점간의 간격이 충분히 넓어 점의 크기보다 충분히 커질 때는 크게 영향을 주지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 두 점간의 간격을 150 micron으로 하였기 때문에 위상의 영향을 크게 받지 않으므로 각 포인트의 위상은 0으로 가정하였다⁴⁾.

III. 새로이 제안된 N-LT 방식

기존의 LT 방식에서는 가능한 물체영상의 모든 포인트에 대해 미리 계산 해놓은 요소 프린지 패턴을 이용함으로써 홀로그래 합성시 엄청난 속도의 증가를 가져왔다. 그러나 이 방식의 가장 큰 단점은 미리 계산해놓은 요소 프린지 패턴의 양이 워낙 많고 따라서 이를 저장할 LT의 메모리 또한 엄청나게 증가하게 된다. 예를 들어, LT 방식에서 물체공간이 100(가로) × 100(세로) × 100(깊이) 이고, 각 요소 프린지 패턴의 용량이 1MB라고 가정하면 전체 룩업테이블의 메모리 용량은 1MB × 100 × 100 × 100 = 1TB 에 이르게 된다.

따라서 본 논문에서는, 기존의 LT 방식과 같이 고속의 계산 속도는 그대로 유지하면서도 룩업테이블의 메모리 용량을 획기적으로 줄일 수 있는 새로운 형태의 룩업테이블인 N-LT를 제시하고 이를 이용한 디지털 홀로그래 고속생성 기법을 제시하였다. 즉, 새로이 제시되는 N-LT 방식에서는 물체의 깊이 방향에 대한 요소 프린지 패턴만을 계산하여 저장하게 된다. 그리고 물체의 한 깊이 방향이 결정되면 그 면에 존재하는 물체 포인트들의 요소 프린지 패턴들은 사전에 계산되어 저장된 그 깊이의 요소 프린지 패턴을 각 물체 포인트까지 좌, 우로 이동시켜 프린지 패턴을 계산, 합산하여 그 깊이 평면에서의 홀로그래 패턴을 계산하게 된다. 같은 방법으로 모든 물체 깊이 평면에서 모든 홀로그래를 계산하여 합산함으로써 물체 전체에 대한 홀로그래 패턴을

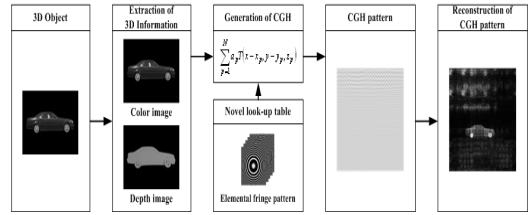


그림 2. 제안된 N-LT 기반의 디지털 홀로그래 생성 및 복원 과정의 전체 블록 다이어그램

계산하게 된다. 따라서 기존 LT 방식은 가로, 세로, 깊이 모든 방향의 물체 포인트에 대한 요소 프린지 패턴의 저장이 요구되나, 제안된 N-LT 방식에서는 단지 물체 깊이 방향에 대한 요소 프린지 패턴만의 사전 저장이 요구되기 때문에 메모리 용량이 크게 줄어들게 된다.

그림 2는 새로이 제안된 N-LT 를 이용한 디지털 홀로그래의 고속 생성 방법의 전체 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 이는 크게 세 단계로 이루어지는데 첫 단계에서는 요소 프린지 패턴을 한 깊이에 하나만 포함하는 N-LT 를 생성하고, 두 번째 단계에서는 생성된 N-LT 의 요소 프린지 패턴을 이용하여 디지털 홀로그래를 생성하고, 마지막으로 단계에서는 생성된 디지털 홀로그래를 복원하는 단계이다.

3.1 N-LT의 구성

앞에서 언급했지만 본 논문에서는 홀로그래를 생성하기 위하여 물체를 자체 발광하는 점들의 집합으로 간주하였다. 그리고 물체의 각 점들은 a_p 의 세기값을 가지고 수직, 수평, 깊이 방향에서 x_p, y_p, z_p 에 위치한다고 가정한다. 기존의 룩업테이블의 크기를 줄이기 위하여 새로이 제시된 N-LT 를 구성하였고, 이 룩업테이블은 물체의 한 깊이에 대해서 하나의 요소 프린지 패턴 $I(x,y)$ 만을 갖는다. 그리고 이 요소 프린지 패턴은 각각의 깊이에서 기준 세기를 갖는 기준점에 대한 프린지 패턴을 나타낸다. 즉, 각각의 요소 프린지 패턴 $T(x,y; z_p)$ 은 각 깊이에 대한 기준 세기의 프레넬 존 플레이트(Fresnel zone plate)가 되고 다음과 같이 주어진다.

$$T(x,y; z_p) = \frac{1}{r_p} \cos [kr_p + kz \sin \theta_R + \phi_p] \quad (8)$$

여기서 r_p 는 p 번째 점과 $(x,y,0)$ 사이의 거리로 식 (2)와 같이 주어진다. 따라서, 새로이 제시되는 N-LT 방식에서는 물체의 깊이 방향에 대한 요소

프린지 패턴만을 계산하여 저장하게 되고, 물체의 한 깊이 방향이 결정되면 그 면에 존재하는 물체 포인트들의 요소 프린지 패턴들은 사전에 저장된 그 깊이의 요소 프린지 패턴을 각 물체 포인트까지 이동시켜 프린지 패턴을 계산하여 그 깊이 평면에서의 홀로그래프 패턴을 계산하게 된다. 같은 방법으로 모든 물체 깊이 평면에서 각각의 홀로그래프를 계산하여 합산함으로써 물체 전체에 대한 홀로그래프 패턴을 계산하게 된다.

3.2 N-LT 기반의 홀로그래프 생성

그림 3은 새로이 제시된 N-LT 를 이용한 디지털 홀로그래프의 생성 절차를 나타낸 것이다. 즉, 그림 3(a)는 특정 깊이 평면에 존재하는 물체영상 포인트로써 두 개의 점광원으로 이루어져 있다. 그림 3(b)

는 제안된 N-LT 방법으로 각 포인트에 대한 프린지 패턴을 합성하는 개념을 나타낸 것이다. 즉, 그림에서 2상안에 존재하는 점광원(Point 1)은 기준점(0,0)을 중심으로 $(-x_p, y_p)$ 의 위치하기 때문에 이미 계산되어 저장된 그 깊이 평면에서의 요소 프린지 패턴을 x, y 방향으로 $-x_p$ 와 y_p 만큼 이동시키게 된다. 또한, 그림에서 4상안에 존재하는 점광원(Point 2)은 $(x_p, -y_p)$ 에 위치하기 때문에 x, y 방향으로 x_p 와 $-y_p$ 만큼 이동 시키게 된다. 이러한 절차를 모든 물체 포인트에 대하여 수행한 후, 모든 요소 프린지 패턴을 중첩하게 된다. 그리고 미리 정해진 홀로그래프의 크기에 따라 기준점을 중심으로 중첩된 영역을 추출해냄으로써 최종적인 홀로그래프 패턴을 합성해 내게 된다. 따라서, N-LT 방식에서 홀로그래프 정보 $I(x,y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(x,y) = \sum_{p=1}^N a_p I(x-x_p, y-y_p; z_p) \quad (9)$$

3.3 요소 프린지 패턴의 해상도

앞에서 언급 했듯이 일반적으로 물체영상의 공간은 연속적이다. 그러나 인간의 시각 능력은 어느 정도 제한되기 때문에 영상의 해상도 저하 없는 이산화가 가능하다. 이때 이산화 정도는 사람의 눈에 인지되지 않을 정도로 충분히 작아 연속적인 두 개의 점이 떨어져 있지 않고 연속적인 점으로 인식될 수 있어야 한다. 즉, 인간은 3 milliradian의 간격을 갖는 두 점을 하나의 점으로 인식하게 됨으로 500 mm의 거리에서 영상을 본다면 150 microns 이하의 간격의 점을 하나의 점으로 인식하게 되어 본 논문에서는 수직, 수평의 이산화 정도를 이 값으로 가정하였다.

본 논문에서 새로이 제안된 N-LT 방식은 요소 프린지 패턴을 이동시킴으로서 물체영상 포인트를 이동시키게 된다. 따라서 홀로그래프의 픽셀 크기가 10 μm 라고 가정하면, 150 μm 를 이동하기 위해서는 15 픽셀을 이동하여야 한다. 예를 들어 물체 이미지 공간의 한 깊이가 100×100 의 점들로 이루어져 있고, 홀로그래프의 픽셀의 크기가 10 μm 라고 주어지면, 이미지 공간의 첫 번째 포인트부터 마지막 포인트까지 표현하기 위해서는 요소 프린지 패턴을 x, y 방향으로 100×15 픽셀 = 1,500 픽셀만큼 각각 이동시켜야 한다. 다시 말하면, 홀로그래프 패턴의 크기가 256×256 인 경우, 전체 요소 프린지 패턴의 크기는 $1,756 (256 + 1,500) \times 1,756 (256 + 1,500)$ 정도가 되어야 한다.

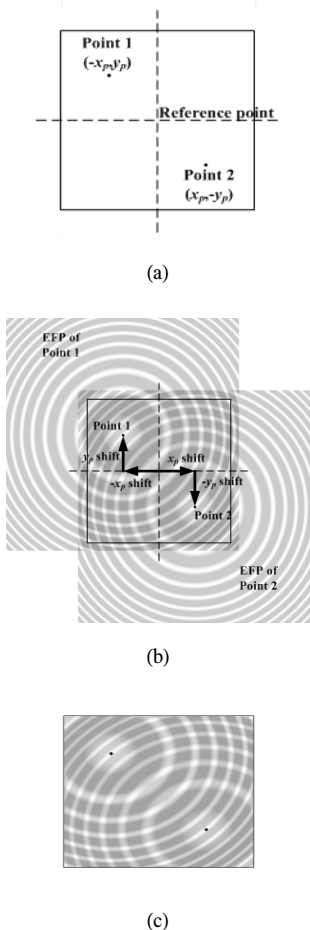


그림 3. N-LT 기반의 디지털 홀로그래프 패턴의 생성과정: (a) 물체영상 포인트, (b) 요소 프린지 패턴의 합성, (c) 합성된 홀로그래프 패턴

IV. 홀로그래프 합성방법의 성능비교

4.1 광선추적 방식과 N-LT방식의 연산성능 비교

본 논문에서 새로이 제안된 디지털 홀로그래프 합성방법은 전통적인 회절기반의 광선추적 방식과 비교하였을 획기적인 연산속도의 개선이 이루어진다. 간단히 살펴보면, 기존의 광선추적 방식은 홀로그래프 패턴을 생성하기 위해서는 최소한 6번의 더하기, 7번의 곱하기, 한 번의 나누기, 한 번의 제곱근, 그리고 두 번의 삼각함수(sine, cosine) 연산을 요구한다. 반면에, 제안된 N-LT 방식에서는 단지 최소한 한 번의 곱하기와 한 번의 더하기만이 필요할 뿐이기 때문에 획기적인 홀로그래프 연산 속도의 개선이 예상된다.

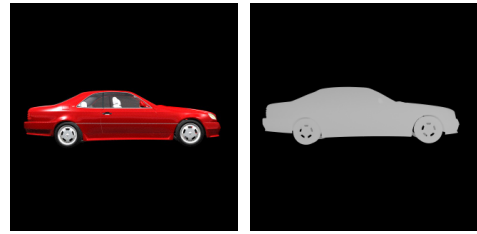
4.2 LT 방식과 N-LT 방식의 성능비교

본 논문에서 새로이 제안된 N-LT 방식은 기존의 LT 방식에 비해 저장 메모리 용량의 획기적인 저하가 예상된다. 예를 들어 물체영상 공간이 100(H) × 100(V) × 100(D) 포인트로 구성되고, 홀로그래프의 크기가 256 × 256 로 주어지는 경우, LT 방식에서는 100 × 100 × 100 = 1,000,000 개의 요소 프린지 패턴이 필요하게 되고, 각각의 요소 프린지 패턴의 크기는 256 × 256 이 된다. 따라서 하나의 요소 프린지 패턴의 크기는 256 × 256 × 8 bit = 64 KB가 되고, 전체 LT의 용량 크기는 64 KB × 1,000,000 = 64 GB에 이르게 된다.

반면에, N-LT 방식에서는 요소 프린지 패턴의 크기가 1,756 × 1,756 이 되고, 각각의 크기는 1,756 × 1,756 × 8 bit = 2.95 MB 로 주어지게 되어 기존의 LT 방식에 비해 커지게 된다. 그러나, 요소 프린지 패턴이 100개만이 필요하기 때문에 전체의 N-LT의 용량 크기는 2.95 MB × 100 = 295 MB로 주어지게 되어 본 논문에서 새로이 제안된 방법에서는 획기적인 필요한 메모리 용량의 획기적인 감소가 이루어진다.

V. 실험 및 결과분석

본 논문에서는 그림 4에 보이는 ‘자동차’ 영상을 실험용 ‘물체 영상’과 ‘깊이 영상’으로 사용하였다. 각 영상은 100 × 100의 해상도를 갖고, 홀로그래프의 크기는 256 × 256으로 가정하였다. 물체의 3차원 정보는 ‘물체 영상’과 ‘깊이 영상’을 합성하여 구하고, 동일 깊이에 있는 물체 포인트들은 그 깊이를



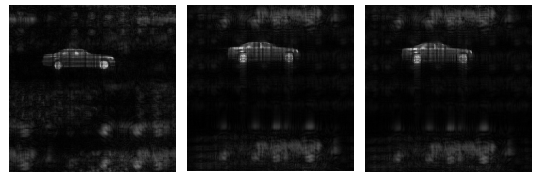
(a) 물체 영상 (b) 깊이 영상

그림 4. 실험에 사용한 자동차 ‘물체 영상’과 ‘깊이 영상’



(a) 광선추적 방식 (b) LT 방식 (c) N-LT 방식

그림 5. 각 방식으로 생성된 홀로그래프 패턴



(a) 광선추적 방식 (b) LT 방식 (c) N-LT 방식

그림 6. 복원된 홀로그래프 영상

대표하는 요소 프린지 패턴을 가지고 계산하기 위하여 깊이 방향으로 정렬하였다.

그림 5(a)는 전통적인 광선추적 방식을 통해 생성된 홀로그래프 패턴을, 그림 5(b)는 기존의 LT 방식을 이용해 생성된 홀로그래프 패턴을, 그림 5(c)는 새로이 제안된 N-LT 방식을 이용하여 생성된 홀로그래프 패턴을 각각 나타낸 것이다. 그리고 그림 6은 그림 5 각각의 홀로그래프 패턴을 디지털적으로 복원한 영상을 나타낸 것으로 세 가지 모두에서 자동차 영상이 깨끗하게 복원되는 것을 볼 수 있다.

표 1은 각 방식에 대한 홀로그래프 연산시간 및 필요한 메모리 용량을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 IMB PC와 Matlab 6.5를 사용하여 수행했다. 표 1의 연산시간은 물체 한 점에 대한 홀로그래프를 계산하는데 걸리는 평균 연산시간을 나타낸다. 즉, 전통적인 광선추적 방식에서는 959.9 ms가 걸리고, 기존의 LT 방식에서는 11.1 ms가 걸리고, 제안된 N-LT 방식에서는 19.7 ms가 걸리게 된다. 따라서 전통적인 광선추적 방식에 비해 기존의 LT 방식

표 1. 각 방식에 대한 홀로그래프 연산시간 및 저장용량

	광선추적 방식	LT 방식	N-LT 방식
한 포인트에 대한 연산시간 (ms)	959.4702	11.0539 (86.8 times)	19.6958 (48.7 times)
메모리 저장용량(Byte)	-	64 GB	295 MB

은 86.9배의 속도 향상을 제안된 N-LT 방식에서는 48.8배의 연산속도가 향상됨이 분석되었다.

한편, 사용된 메모리 저장용량의 경우는 기존의 LT 방식에서는 요소 프린지 패턴들을 저장하기 위해 64GB의 메모리 공간을 필요로 하지만 제안된 N-LT 방식에서는 단지 295MB만을 필요함을 알 수 있다. 즉, 기존의 LT 방식에서는 64 KB의 요소 프린지 패턴이 전체 물체영상 공간인 100(H) × 100(V) × 100(D) = 1,000,000 개수만큼 필요하게 되어 총 메모리 저장용량이 64GB에 이르게 된다. 반면에, 제안된 N-LT 방식에서는 물체영상 공간인 100(H) × 100(V) × 100(D)에서 단지 깊이 방향의 100개 요소 프린지 패턴만이 필요하므로 결과적으로, 총 메모리 저장용량이 295MB 정도만이 사용된다. 따라서, 제안된 N-LT 방식에서 요소 프린지 패턴의 저장용량은 2.95MB로 주어져 기존 LT 방식에 비해 6.85배 크지만 전체적인 메모리 용량은 기존 LT 방식에 비해 1/217의 공간만이 필요하게 됨이 분석되었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 기존의 LT 방식의 연산속도는 그대로 유지하면서도 데이터 저장용량을 획기적으로 줄여줄 수 있는 새로운 N-LT 방식을 제시하였다. 제안된 방식에서는 기존 LT 방식에서와 같이 3차원 물체의 모든 방향의 포인트가 아닌 각 깊이 방향의 포인트에 대한 요소 프린지 패턴만을 저장하고, 그 깊이가 평면에 존재하는 포인트들의 프린지 패턴은 요소 프린지 패턴을 이동시켜 계산하게 된다. ‘자동차’ 영상을 사용한 실험결과 제안된 N-LT 방식은 기존의 광선추적(ray-tracing) 방식에 비해 연산속도가 48.7배 향상되고, 기존의 LT 방식에 비해 1/217 정도의 데이터 저장 공간이 적게 필요함이 분석되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김은수, 이승현 공역, 3차원 영상의 기초, 기다리, 1998.
- [2] C. J. Kuo and M. H. Tsai, *Three-Dimensional Holographic Imaging* (John Wiley & Sons, 2002).
- [3] A. W. Lohmann and D. P. Paris, “Binary Fraunhofer holograms generated by computer,” *Appl. Opt.* 6, 1739-1748 (1967).
- [4] M. Lucente, “Interactive computation of holograms using a look-up table,” *J. Electron. Imag.* 2, 28-34 (1993).
- [5] P. Hariharan, *Optical Holography; Principles, techniques, and applications* (Cambridge Studies in Modern Optics, 1996).

김 승 철 (Seung-Chul Kim)

정회원



2002년 2월 광운대학교 전자공학
학과 졸업

2004년 2월 광운대학교 전자공
학과 석사

2007년 2월 광운대학교 전자공
학과 박사

2007년 3월~현재 광운대학교 전
자공학과 차세대 3D 디스플레이 연구센터 연구교수
<관심분야> 3차원 디스플레이, 홀로그래픽 디스플레이, 광공학

김 은 수 (Eun-Soo Kim)

중신회원

한국통신학회지 Vol.24, No. 9A 참조