

하드웨어 구현을 위한 컴퓨터 생성 홀로그램 연산의 최적화

*최현준 **서영호 **김동욱

*안양대학교 정보통신공학과, **광운대학교 실감미디어 연구소

*hjchoi@anyang.ac.kr

An Optimization of Computer-Generated Hologram Operation for Hardware Implementation

*Choi, Hyun-Jun **Seo, Young-Ho **Kim, Dong-Wook

*Information & Communication Eng., Anyang University

**Realistic Media Institute, Kwangwoon University

요약

컴퓨터 생성 홀로그램(computer-generated hologram, CGH) 기법은 광학 신호들을 근사화한 후 PC에서 수학적 연산으로 디지털 홀로그램을 생성하는 기술이다. 본 논문에서는 CGH 기법을 하드웨어로 구현할 경우 완벽한 병렬처리와 파이프라이닝이 가능하도록 연산식을 최적화하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 홀로그램의 이전 좌표에서 계산된 값에 일정한 값을 더하여 홀로그램을 생성하는 반복가산 기법의 일반항을 분석하여 하드웨어에 최적화된 수식으로 변형하는 것이다. 최적화된 수식의 경우 현재 좌표의 홀로그램을 계산하기 위해 이전 좌표에서 연산되었던 결과값을 기다렸다가 사용하지 않기 때문에 실시간 디지털 홀로그래피를 위한 전용 하드웨어의 설계에 적합할 것이다.

1. 서론

본 논문에서는 최근 가장 이상적인 3차원 영상 디스플레이 기술로 주목 받고 있는 홀로그래픽 디스플레이를 위해 디지털 홀로그램을 PC에서 수학적 계산으로 생성할 수 있는 컴퓨터 생성 홀로그램 기술에 대해 다룬다[1]. 이 기술은 1966년 Brown과 Lohmann에 의해 제안되었으나 그 당시 장비들의 컴퓨팅 능력부족으로 1990년대 들어 다시 연구되고 있는 분야이다. CGH 기법을 이용할 경우 실제 공간상의 객체 혹은 가상의 객체로부터 손쉽게 디지털 홀로그램을 얻을 수 있다. 또한 별도의 광학장치 없이도 일반 영상획득 장치(디지털 카메라, CCD 카메라, 캠코더 등)들을 적절히 구성하여 디지털 홀로그램을 획득할 수 있다. 이런 장점에도 불구하고 CGH 기법으로 디지털 홀로그램을 생성하기 위해서는 상당한 연산량이 요구된다[2]. MIT[3]에서는 일반적인 CGH 연산식의 각 항들을 미리 계산해 놓은 LUT(look-up table)을 이용하는 기법을 제안하였다. 하지만 이런 기법들은 많은 하드웨어 자원을 사용한다. 최근에는 DSP, FPGA, 그래픽 카드(graphic processor unit, GPU)등을 이용하여 연산속도를 높이는 기술들도 소개되고 있다 [6-11].

본 논문에서는 CGH 연산을 전용 하드웨어로 구현하기 위해 연산식을 하드웨어 구현에 적합한 형태로 최적화 시키는 방법을 제안한다.

2. 컴퓨터 생성 홀로그램

디지털 홀로그램은 그림 1과 같이 광학 시스템을 이용해 디지털 데이터로 획득할 수 있지만 이러한 광학 시스템을 수학적으로 모델링한(그림 1(a)) 연산에 의해 생성할 수도 있다. 이러한 수학적 연산에 의해 생성된 홀로그램을 CGH라고 한다. 이 기법은 물체의 광원에 해당하는 물체파(object wave)의 표면을 디지털화된 화소로 이루어진

한 디지털 화면을 사용하여 식 (1)을 이용하여 계산된다[2].

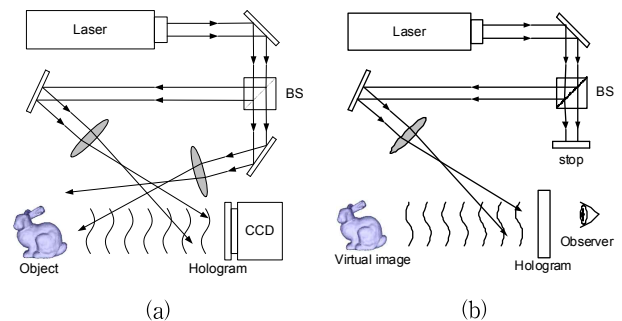


그림 1. 디지털 홀로그램의 획득 및 객체 재생;

(a) 획득, (b) 객체 재생.

$$I_{\alpha} = \sum_j^N A_j \cos(k \sqrt{(px_{\alpha} - px_j)^2 + (py_{\alpha} - py_j)^2 + z_j^2}) \quad (1)$$

여기서 α 와 j 는 홀로그램과 3차원 객체, k 는 참조파의 파수(wave number)로 $2\pi/\lambda$ 로 정의되고, p 는 홀로그램의 화소 크기(pixel pitch), x_{α} 와 y_{α} 는 홀로그램의 좌표, x_j , y_j , 및 z_j 는 3차원 객체의 좌표를 나타낸다.

식 (1)을 Taylor 전개(Taylor expansion) 후 첫 번째 항으로 근사화를 시키면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_{\alpha} = \sum_j^N A_j \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(Z_j + \frac{p^2}{2Z_j} ((x_{\alpha} - x_j)^2 + (y_{\alpha} - y_j)^2) \right)\right) \quad (2)$$

식 (2)의 항들을 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta_x = \frac{p^2}{2\lambda z_j} \times 2 \quad (8)$$

$$I_\alpha = \sum_j^N A_j \cos(2\pi(\theta_z + \theta_H)) \quad (3)$$

$$(\theta_z = \frac{z_j}{\lambda}, \theta_H = \frac{p^2}{2\lambda z_j}(x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2))$$

여기서 $x_{\alpha j}$ 와 $y_{\alpha j}$ 는 $(x_\alpha - x_i)$ 와 $(y_\alpha - y_i)$ 를 의미한다.

디지털 홀로그래프에서의 한 점 $(x_\alpha + x_i, y_\alpha)$ 에서의 위상 $\theta_H(x_{\alpha j} + n, y_{\alpha j}, z_j)$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_H(x_{\alpha j} + n, y_{\alpha j}, z_j) &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}((x_{\alpha j} + n)^2 + y_{\alpha j}^2) \\ &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}(x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2) + \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2nx_{\alpha j} + n^2) = \theta_H(x_{\alpha j}, y_{\alpha j}, z_j) + \Gamma_{xn} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Γ_{xn} 은 다음과 같이 정의한다.

$$\Gamma_{xn} = \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2nx_{\alpha j} + n^2) \quad (5)$$

식 (5)에 n 값들을 대입하면, $n=1$ 일 때 Γ_{x1} 은,

$$\Gamma_{x1} = \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2x_{\alpha j} + n^2) \quad (6)$$

$n=2$ 일 때 Γ_{x2} 는,

$$\begin{aligned} \Gamma_{x2} &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}(4x_{\alpha j} + 4) \\ &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2x_{\alpha j} + 1) + \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2x_{\alpha j} + 1) + \frac{p^2}{2\lambda z_j} \times 2 \\ &= \Gamma_{x1} + \Gamma_{x1} + \Delta_x \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 Δ_x 는 다음과 같이 정의한다.

다시, $n=3$ 일 때 Γ_{x3} 을 계산해보면,

$$\begin{aligned} \Gamma_{x3} &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}(6x_{\alpha j} + 9) \\ &= \frac{p^2}{2\lambda z_j}(4x_{\alpha j} + 4) + \frac{p^2}{2\lambda z_j}(2x_{\alpha j} + 1) + \frac{p^2}{2\lambda z_j} \times 4 \\ &= \Gamma_{x2} + \Gamma_{x1} + 2\Delta_x \end{aligned} \quad (9)$$

즉, $n=N$ 일 때 Γ_{xN} 은 다음과 같이 일반화 시킬 수 있다.

$$\Gamma_{xN} = \Gamma_{x(N-1)} + \Gamma_{x1} + (N-1)\Delta_x \quad (10)$$

식 10에서 Γ_{x1} 과 Δ_x 값을 미리 계산해 놓으면 디지털 홀로그래프의 x 축 첫 번째 좌표 값들만을 식 2를 이용하여 계산하고 $x+1$ 번째부터는 Γ_{x1} , Δ_x , 그리고 이전에 계산된 $\Gamma_{x(N-1)}$ 값을 가산함으로써 CGH 연산을 수행할 수 있다. 이런 연산기법을 그림 2에서 보이고 있다[2]. 그림 2의 명암처리된 블록은 식 (2)로 계산되는 좌표값, 나머지 블록은 명암처리된 블록에 식 (10)으로 계산한 값들을 더해주면 구해지는 좌표값들이다.

3. CGH 연산식의 최적화

2장에서 기술한 CGH 연산방식의 경우 하드웨어 구현을 위한 기법으로 제안되었지만 홀로그래프 좌표의 변화에 따라 매번 새로운 값들을 계산해야 하고 계산된 값들을 모두 합하여 디지털 홀로그래프를 출력할 때 병목현상(bottleneck)이 발생하는 문제가 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 CGH 연산식을 완벽한 병렬처리를 위한 적절한 형태로 변형하였다.

식 (10)에 $N=0,1,2...n$ 까지 대입해 보면 Γ_x 항의 배수는 1, 2, 3, 4, 5...와 같은 등차수열임을 알 수 있고, Δ_x 항의 배수는 0, 1, 3, 6, 10...으로 증가하는데 이 수열의 계차를 구해보면 1, 2, 3, 4, 5...와 같은 등차수열임을 알 수 있다. 따라서 원 수열을 a_n , 계차수열을 b_n 이라고 할 때 다음 식과 같이 일반항을 정의할 수 있다.

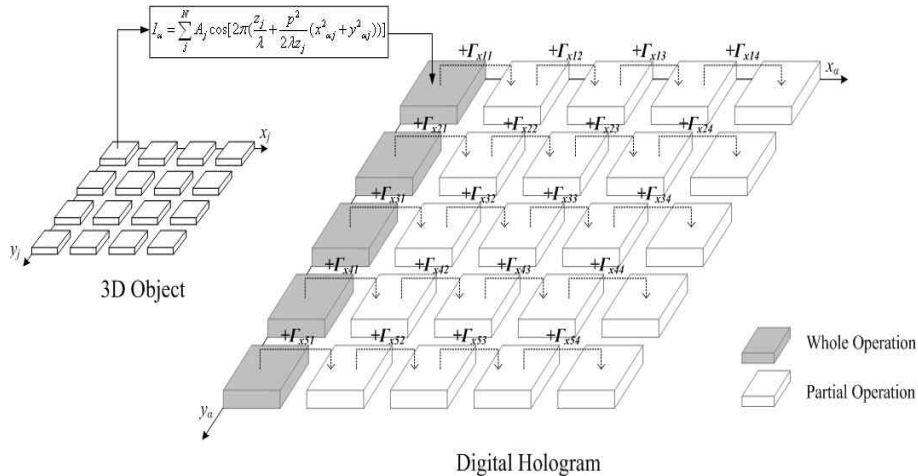


그림 2. 반복 가산을 이용한 CGH 알고리즘

$$a_n = a_1 + \sum_{k=1}^{n-1} b_k \Sigma \quad (11)$$

Δx 배수의 일반항을 구해보면,

$$a_n = \sum_{k=1}^{n-1} k = \frac{n(n-1)}{2} \quad (12)$$

임을 알 수 있다. Γx 항과 Δx 항의 일반항으로 식 (10)을 다음의 식 (13)으로 변경할 수 있다.

$$\Gamma_{x,N} = N\Gamma_{x,1} + \frac{N(N-1)}{2} \Delta_x \quad (13)$$

식 (10)의 경우 현재 Γx 값을 구하기 위해서는 그림 2에서와 같이 이전 좌표에서 연산되었던 값이 필요하기 때문에 완벽한 병렬처리가 불가능하였다. 하지만 식 (12)를 이용할 경우 이전 좌표의 연산결과를 기다릴 필요 없이 각 좌표에서 독립적인 연산이 가능하므로 CGH 연산을 완벽히 병렬처리 및 파이프라이닝 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 CGH 기법을 하드웨어로 구현하기 위해 최적화된 수식을 유도하였다. 이전에 제안된 수식의 경우 디지털 홀로그래프의 현재 좌표값을 계산하기 위해서는 이전 좌표의 계산 결과값이 필요하였다. 이 때문에 하드웨어 구현시 병렬처리가 힘들었다. 본 논문에서는 CGH 연산시 발생하는 이런 인과관계를 없애 하드웨어 구현시 병렬처리 및 파이프라이닝이 가능하도록 하였다.

감사의 글

본 논문은 서울시 신기술 연구개발 지원사업(NT080528)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] B. R. Brown and Adolf W. Lohmann, "Complex spatial filtering with binary masks," *Applied Optics*, vol. 5, pp. 967-969, June 1966.
- [2] 최현준, 서영호, 김동욱, "반복 가산 기법을 이용한 Fresnel 홀로그래프의 고속 계산 알고리즘", *한국통신학회논문지*, vol. 33, no. 5, pp. 386-394, 2008년 5월.
- [3] M. Lucente, "Interactive Computation of Holograms Using a Look-up Table," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 2, no. 1, pp. 28-34, Jan. 1993.
- [4] M. Reichert, S. Zwick, T. Haist, C. Kohler, H. Tiziani, and W. Osten, "Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in liquid-crystal-display-based holographic tweezers," *Applied Optics*, vol. 45, no. 5, pp. 888-896, Feb. 2006.

- [5] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," *Optics Express*, vol. 14, no. 2, pp. 603-608, Jan. 2006.