

컴퓨터 생성 홀로그램의 고속 병렬 연산을 위한 연산방식 및 하드웨어 구조

*양월성 **최현준 *서영호 *유지상 *김동욱
 *광운대학교 **안양대학교
 *wsyang@kw.ac.kr

Methodology and its Hardware Architecture for High-speed Parallel Computation of Computer Generated Hologram

*Wol-Sung Yang **Hyun-Jun Choi *Young-Ho Seo *Ji-Sang Yoo and
 *Dong-Wook Kim

*Kwang-woon University **Anyang University

요약

본 논문에서는 연산에 의해 디지털 홀로그램(computer-generated hologram, CGH)을 생성할 때 많은 계산량으로 속도가 지연되는 문제를 해결하기 위해 연산식을 수정하고 이를 하드웨어로 구현한다. 기존에 제시된 CGH 연산 알고리즘에 비해 제안한 알고리즘은 디지털 홀로그램의 완벽한 병렬처리가 가능하게 하여 속도지연의 문제를 해소한다. 구현 결과 하드웨어가 주어진다면 최대 3사이클에 한 광원으로부터의 홀로그램성분 전체를 연산할 수 있고, 파이프라인 기법을 사용하면 두 사이클의 지연시간 후 매 사이클마다 한 광원에 대한 홀로그램 연산결과를 얻을 수 있다.

1. 서론

최근 3D 영상 및 실감영상에 대한 관심이 높아지면서 완전한 3차원 영상을 구현할 수 있는 홀로그래피에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. 홀로그래피는 1948년 Dennis Gabor에 의해 최초로 제안되었으며, 그 원리는 그림(1)과 같이 3차원 물체에서 나오는 물체파(object wave)와 기준파(reference wave)의 간섭에 의해 생성되는 간섭무늬를 기록하여 생성하고, 기록된 간섭무늬에 생성할 때 사용하였던 기준파(reference wave)를 비추주면 회절현상에 의해 원 영상이 복원된다[1]. 디지털 홀로그램은 간섭무늬의 기록매체를 광학장비 대신 CCD 카메라로 기록하거나 또는 간섭무늬를 수학적으로 계산하는 컴퓨터 생성 홀로그램(computer generated hologram, CGH) 방법으로 생성할 수 있다[2].

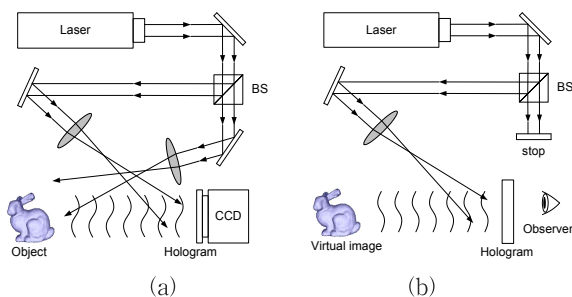


그림 1. 디지털 홀로그램; (a) 기록, (b) 복원.

CGH는 연산량이 많아 실제 사용하는데 있어서 한계가 있다. 즉, $H \times V$ 크기의 물체(광원)에 대한 $M \times N$ 크기의 홀로그램을 만들기 위해서는 $H \times V \times M \times N$ 만큼의 연산량이 필요하다. 따라서 최근 이 연산량을 줄이거나[3] 연산속도를 높이는 연구[4~12]가 진행 중이다. [3]은 간섭현상을 수식화한 [2]의 결과를 근사화하고 recursive 식으로 변환하여 연산량을 줄였다. 연산속도를 높이는 방법은 전용 하드웨어를 설계하는 방법[4~7]과 graphic processor를 사용하는 방법[8~12]으로 진행되고 있다. 그러나 이 두 경우 모두 [3]의 recursive 방법을 기반으로 하고 있기 때문에 속도를 증가시키는 것에 한계가 있다.

본 논문에서는 [3]에서 제시한 식을 수정하여 recursive 성질을 없애고 완전한 병렬연산이 가능하도록 한다. 또한 이 식을 기반으로 하드웨어를 설계하고, 그 결과 속도의 증가를 보인다.

2. 컴퓨터 생성 홀로그램 (CGH)

연산에 의한 홀로그램 생성, 즉 CGH는 기본적으로 두 광파(기준파와 물체파)의 간섭현상을 수학적으로 모델링한 것이며, 그 결과는 식 (1)과 같다[2][3].

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

여기서 a 와 j 는 홀로그래프 3차원 물체의 특정 좌표를 의미한다. k 는 기준파의 파수(wave number)로 $2\pi/\lambda$ 로 정의되고, p 는 홀로그래프와 물체의 화소크기(pixel pitch)(여기서는 물체와 홀로그래프의 화소크기를 동일한 것으로 간주함), (x_a, y_a) 는 홀로그래프의 좌표, (x_j, y_j, z_j) 는 3차원 물체의 좌표를 각각 나타낸다.

2.1 고속연산을 위한 Recursive CGH 식

식(1)에서 x_a, y_a, x_j, y_j 에 비해 z_j 가 충분히 크다고 가정하면(실제 홀로그래프의 크기나 물체의 크기보다 홀로그래프에서 물체까지의 거리가 매우 크며, 이것을 Fresnel 홀로그래프라 함), Taylor 급수로 전개한 후 두 번째 항 이 후를 제거하여 근사하면,

$$\begin{aligned} I_{\alpha,j} &= A_j \cos \left[2\pi \left\{ \frac{z_j}{\lambda} + \frac{p^2}{2\lambda z_j} (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2) \right\} \right] \\ &= A_j \cos 2\pi \theta_H \\ &= A_j \cos 2\pi (\theta_Z + \theta_{XY}) \end{aligned} \quad (2)$$

으로 나타 낼 수 있다. 여기서, $x_{\alpha j} = x_a - x_j, y_{\alpha j} = y_a - y_j$ 이고,

$$\theta_Z = \frac{z_j}{\lambda} \quad (3)$$

$$\theta_{XY} = \frac{p^2}{2\lambda z_j} (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2) = \frac{\Delta}{2} (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2) \quad (4)$$

이며, $\Delta = p^2/\lambda z_j$ 이다. 만약 물체의 한 광원으로부터 미치는 홀로그래프 화소의 영향을 한 개의 수평방향(열) 홀로그래프들을 단위로 연산한다면, 한 열의 홀로그래프에서 식 (3)은 동일하고, 식 (4) 중 $x_{\alpha j}$ 만 변한다.

디지털 홀로그래프에서 x_a 에서 dn 만큼 우측의 점 $(x_a + n, y_a)$ 에서의 위상 $\theta_{XY,d}$ 는,

$$\begin{aligned} \theta_{XY,n} &= \frac{\Delta}{2} [(x_{\alpha j} + n)^2 + y_{\alpha j}^2] \\ &= \frac{\Delta}{2} (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2) + \frac{\Delta}{2} (2nx_{\alpha j} + n^2) \\ &= \theta_{XY} + \frac{\Delta}{2} (2nx_{\alpha j} + n^2) \\ &= \theta_{XY} + \Gamma_n \end{aligned} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Γ_n 을 recursive 식으로 만들면,

$$\begin{aligned} \Gamma_n &= \Gamma_{n-1} + \Gamma_1 + (n-1)\Delta \\ \Gamma_0 &= 0 \\ \Gamma_1 &= \frac{\Delta}{2} (2x_{\alpha j} + 1) \end{aligned} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다.

이 식은 홀로그래프의 특정 열에서 맨 좌측(θ_{XY})과 가 다음 화소의 값(Γ_1)을 구하면 이 값들을 이용해서 그 우측 화소들의 값을 그 전 화

소의 값과 두 번째 화소의 값으로 구할 수 있는 recursive 식이다. 이 식을 기반으로 하드웨어를 구성한다면 맨 좌측과 그 우측 화소를 연산하는 하드웨어와 식 (6)의 첫 번째와 같이 일반식을 구현하면 이 일반식을 구현한 하드웨어로 그 우측의 화소값들을 반복계산에 의해 구할 수 있다.

2.2 고속 병렬연산을 위한 CGH 식

식 (6)의 첫번째 식은,

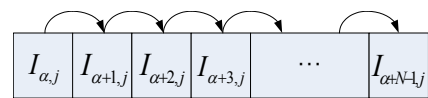
$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{\Delta}{2} (2x_{\alpha j} + 1) = \Gamma_1 \\ \Gamma_2 &= \frac{\Delta}{2} (4x_{\alpha j} + 4) = \Gamma_1 + \Gamma_1 + \Delta = 2\Gamma_1 + \Delta \\ \Gamma_3 &= \frac{\Delta}{2} (6x_{\alpha j} + 9) = \Gamma_2 + \Gamma_1 + 2\Delta = 3\Gamma_1 + 3\Delta \\ \Gamma_4 &= \frac{\Delta}{2} (8x_{\alpha j} + 16) = \Gamma_3 + \Gamma_1 + 3\Delta = 4\Gamma_1 + 6\Delta \\ &\dots \end{aligned} \quad (7)$$

이 되며, 이것은 계차수열(progressive sequences of differences)이다. 이 수열의 일반항은,

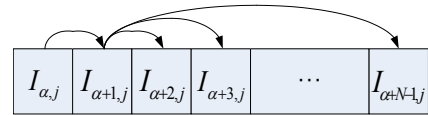
$$\Gamma_n = n\Gamma_1 + \frac{1}{2}n(n-1)\Delta \quad (8)$$

가 된다.

식 (8)과 식 (6)을 비교하면, 그림 2에 나타낸 바와 같이 식 (8)은 일단 Γ_1 을 계산하면 n 번째 화소를 계산할 때 $(n-1)$ 번째 화소의 값을 필요로 하지 않고 Γ_1 만을 사용한다는 것이다. 이것은 식 (6)과는 달리 물체의 특정 광원에 대해 홀로그래프의 특정 열을 하드웨어로 계산할 때 recursive 연산을 수행하지 않고 각 화소를 병렬로 연산할 수 있는 것을 의미한다.



(a) 식 (6)에 의한 한 열의 연산방식



(b) 식 (8)에 의한 한 열의 연산방식

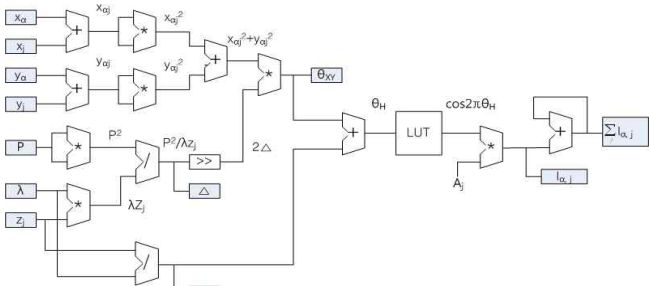
그림 2. 식 (6)에 의한 연산과 식(8)에 의한 연산

3. 하드웨어 구현 및 병렬연산

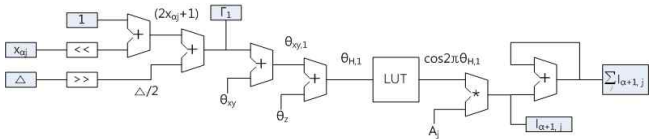
이 장에서는 앞 절에서 제안한 병렬 CGH 연산식을 기반으로 병렬 연산을 수행할 수 있는 단위 연산 셀들을 설계하고, 이 셀들을 이용한 병렬연산 방법에 대해방법 설명한다.

3.1 병렬 CGH 셀 구조

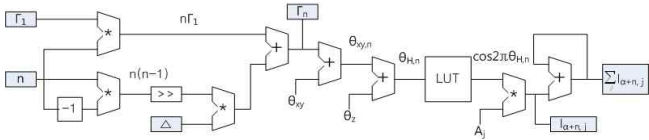
식 (8)을 기반으로 병렬연산을 수행하는 하드웨어를 구현할 때 세 가지의 단위 연산 블록(셀, cell)이 필요하다. 이 세 연산 셀을 그림 3에 나타내었다. (a)의 $I_{\alpha,j}$ 연산 셀은 식 (2)의 특정 열의 맨 좌측 화소를 연산하는 셀이며, (b)는 식 (6)의 세 번째 식을 기반으로 하는 $I_{\alpha+1,j}$ 다. 또한 (c)는 식 (8)을 수행하여 두 번째 화소 우측의 화소를 계산하는 연산셀이다. (c)의 경우 각 위치에 해당하는 n값은 상수이므로 이 값을 입력하면 각 위치의 화소값을 연산할 수 있다. 이 세 셀이 모두 한 열의 맨 좌측부터 연산한다면 $x_\alpha = 0$ 이다. 이 그림들에서 LUT(look-up table)은 $\cos(2\pi\theta_{H,d})$, $d = 0, 1, n$ 의 값을 미리 저장해 놓은 것이다. cosine함수의 값은 ± 1 의 범위에 있고, 시뮬레이션 결과 cosine 값의 정확도에 홀로그램에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판명되어, 본 논문에서는 $2\pi\theta_{H,d}$ 에 4 비트를 할당하였다.



(a) $I_{\alpha,j}$ 연산 셀



(b) $I_{\alpha+1,j}$ 연산 셀



(c) $I_{\alpha+n,j}$ 연산 셀

그림 3. 세 가지 단위 연산 셀

여기서, 만약 한 열 이상에 해당하는 하드웨어를 구현할 경우 각 열에 해당하는 y_α 값을 고려하여 구성하여야 한다. 예를 들어 맨 위 열에서는 $y_\alpha = 0$, 그 다음 열에서는 $y_\alpha = 1$ 등이다.

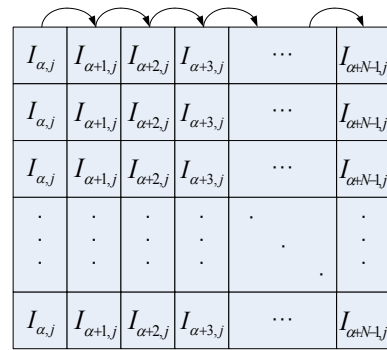
위 세 가지 셀이 물체의 모든 광원에 의한 영향을 수용하기 위해서는 각 광원에 의한 영향을 누적덧셈(accumulator)하여야 하는데, 각 셀의 맨 오른쪽에 있는 accumulator가 그것이다.

3.2 CGH 병렬 연산

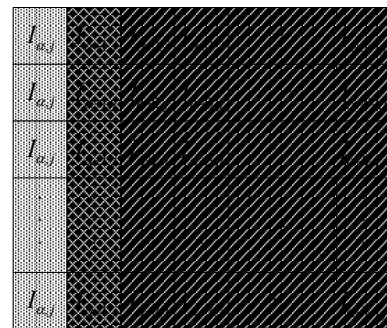
식 (6)과 식(8)을 구현하는 하드웨어를 한 프레임에 해당하는 만큼 구현했을 때 두 방법의 연산방법을 비교하면 그림 4와 같다. 그림 4(a)

는 식 (6), 즉 이 전의 방식을 구현한 것으로, 앞에서 설명한 바와 같이 맨 첫 번째 행들은 모두 병렬로 연산하고, 그 결과를 두 번째 행이 받아 연산을 수행하며, n번째 행은 (n-1)번째 행의 연산결과를 받아 연산을 수행한다. 따라서 이 방식으로 한 광원에 대한 모든 홀로그램의 연산을 수행하는 데에는 홀로그램의 행의 개수만큼의 사이클이 필요하다.

반면, 그림 4 (b)에 나타낸 식 (8)을 기반으로 하는 경우 첫 번째 행과 두 번째 행은 그림 4 (a)와 동일하다. 그러나 두 번째 행이 연산된 후에는 이 행의 값을 다른 모든 행에서 사용하여 병렬로 연산을 수행하므로 다른 모든 셀의 연산은 한 사이클만에 수행할 수 있다. 따라서 이 경우 한 광원에 사용되는 연산 사이클은 단 3개에 불과하다.



(a) 식 (6)에 의한 연산방식



(b) 식 (8)에 의한 연산방식

그림 4. 한 광원에 대한 홀로그램 연산방식

3.3 CGH 병렬 연산의 파이프라이닝

식 (8)에 의한 연산방식, 즉 그림 4(b)의 방식은 한 광원에 대해 모든 연산을 수행하고 그 다음 광원에 대해 연산하여야 하는 것은 아니다. 더욱 고속의 연산을 수행하고자 하면 셀연산의 파이프라이닝(pipelining) 연산을 수행하면 되는데, 이를 표 1에 나타내었다.

즉, 첫 번째 행을 계산한 다음 두 번째 행을 계산할 때 첫 번째 행을 계산하는 셀 행은 연산을 수행하지 않고 대기상태가 된다. 이 대기상태를 그대로 두지 않고 다음 광원에 대한 첫 번째 행을 연산할 수 있다. 이와 마찬가지로 동작은 두 번째와 나머지 행들에 대해서도 그대로 적용되며, 따라서 표 1에 나타낸 것과 같이 모든 광원에 대한 연산이 끝날 때까지 모든 하드웨어가 쉬지 않고 연산을 수행하게 된다. 단, 첫 번째 광원과 두 번째 광원을 연산할 때 두 번째 셀 행과 세 번째 셀 행은 한 사이클과 두 사이클을 대기상태에 있고, 맨 마지막과 rm 전의

광원에 대해서는 두 번째 셀 행과 나머지 셀들이 한 사이클과 두 사이클 동안 연산을 하지 않는다.

따라서 이 파이프라이닝을 적용하면 첫 번째 광원에 대한 모든 결과는 세 번째 사이클만에 나오게 되며, 그 다음 사이클부터 사이클 당 한 광원의 연산 전체를 얻을 수 있다.

3.4 하드웨어 구현 결과

그림 (3)의 셀들로 구성되는 하드웨어를 구현한 결과를 표 2에 정리하였다. 이 표의 각 셀에 대한 하드웨어는 shifter(<<, >>)나 diminisher(-1)은 제외하였다. 또한 +는 가산기, *(또는 /)는 승산기, LUT는 cosine함수의 look-up table을 각각 나타낸다. 한 프레임에 해당하는 하드웨어가 모두 구현될 경우 총 하드웨어 양도 표에 나타내었는데 여기서 $H(I_X)$ 는 I_X 를 구하는 하드웨어의 양, 즉 각 단위 셀의 양을 나타낸다.

표 1. 식 (8)에 의한 연산방식의 파이프라이닝

사이클 \ 광원	1	2	3	4	5
0	$I_{\alpha,j}^0$	$I_{\alpha+1,j}^0$	$I_{\alpha+n,j}^0$		
1		$I_{\alpha,j}^1$	$I_{\alpha+1,j}^1$	$I_{\alpha+n,j}^1$	
2			$I_{\alpha,j}^2$	$I_{\alpha+1,j}^2$	$I_{\alpha+n,j}^2$
3				$I_{\alpha,j}^3$	$I_{\alpha+1,j}^3$
4					$I_{\alpha,j}^4$

표 2. 하드웨어 구현 결과

항목		값
단위 셀	$I_{\alpha,j}$	+: 5, *: 8, LUT: 1
	$I_{\alpha+1,j}$	+: 5, *: 1, LUT: 1
	$I_{\alpha+n,j}$	+: 4, *: 4, LUT: 1
한 프레임($M \times N$)에 해당하는 총 하드웨어		$M[H(I_{\alpha,j}) + H(I_{\alpha+1,j}) + (N-2)H(I_{\alpha+n,j})]$

4. 결론

본 논문에서는 고속 CGH 생성을 병렬로 수행할 수 있는 CGH 생성식과 그에 따른 하드웨어 구조를 제안하였다. 이 방법은 한 프레임에 해당하는 셀들이 하드웨어로 주어진다면 지연시간 두 사이클 후 매 사이클마다 한 광원에 대한 홀로그램을 연산할 수 있다. 따라서 3차원 물체의 광원 수에 해당하는 사이클 만에 완전한 한 프레임의 홀로그램을 연산할 수 있다.

제한한 방식은 주어지는 하드웨어 양과 연산속도가 정확한 상보 관계를 이룬다. 따라서 하드웨어 또는 연산속도의 요구에 맞추어 하드웨어를 실현하여 수행할 수 있으므로, 고속으로 CGH를 생성하는 데 효율적으로 사용할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [KI002058, 대화형 디지털 홀로그램 통합서비스 시스템의 구현을 위한 신호처리 요소 기술 및 SoC 개발]

참고 문헌

- [1] S. Benton and V. M. Bove Jr., Holographic Imaging, John Wiley and Sons Inc., 2008.
- [2] Mark Lucente, "Interactive Computation of Holograms Using a Look-up Table", Journal of Electronic Imaging, vol. 2, No. 1, pp. 28-34, Jan. 1993.
- [3] H. Yoshikawa, S. Iwase, and T. Oneda, "Fast Computation of Fresnel Holograms employing Differences", Proceeding of SPIE, vol. 3956, pp. 48-55, 2000.
- [4] T. Shimobaba, T. Ito, "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition", Computer Physics Communications, vol. 138, pp. 44-52, 2001.
- [5] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, "Special-Purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography," Optics Express, Vol. 13, No. 6, pp., March 2005.
- [6] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie, "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography", Optics Express, Vol. 17, No. 16, pp. 13895-13903, Aug, 2009.
- [7] Y.-H. Seo, H.-J. Choi, J.-S. Yoo, and D.-W. Kim, "An architecture of a high-speed digital hologram generator based on FPGA", Journal of Systems Architecture, Vol. 56. pp. 27-37, Dec. 2009.
- [8] 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, January 2006.
- [9] L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor, and J. Watson, "Computer generated holography using parallel commodity graphics hardware," Optics Express, Vol. 14, No. 17, August 2006.
- [10] Y. Pan, X. Xu, S. Solanki, X. Liang, R. Bin, A. Tanjung, C. Tan, and T.-C. Chong, "Fast CGH computation using S-LUT on GPU", Optics Express, Vol. 17, No. 21, pp. 18543-18555, Oct. 2009.
- [11] Y.-Z. Liu, J.-W. Dong, Y.-Y. Pu, B.-C. Chen, H.-X. He, and H.-Z. Wang, "High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes", Optics Express, Vol. 18, No. 4, pp. 3345-3351, Feb. 2010.
- [12] T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL", Optics Express, Vol. 18, No. 10, pp. 9955-9960, May. 2010.