

위상 공역파를 이용한 광학적 연산 방식

○ * ** ** **
 엄 손 영 이 권 연, 권 원 현, 박 한 규
 * 한국 전자 통신 연구소
 ** 연세대학교 전자공학과

Optical Arithmetic Technique Using Optical Phase Conjugate Wave

○ * ** ** **
 Soon-Young Eom, Kwon-Yeon Lee, Won-Hyun Kwon, Han-Kyu Park

* Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI)
 ** Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.

Abstract

Parallel optical arithmetic techniques have been developed using the correlation property of optical phase conjugate wave generated by degenerated four wave-mixing.

In this paper, conventional rectangular-type coded pattern used for optical logic system is replaced by circular one for effective beam coupling in a photorefractive BaTiO₃ material.

By adequately adjusting the distance between circular-type pixels of the input pattern and grouping the correlated output, optical binary half addition/subtraction, binary multiplication and, matrix-matrix computation are demonstrated.

I. 서 론

LiNbO₃, Bi₁₂SiO₂₀(BSO), BaTiO₃, SBN과 같은 광굴절 매질에 광이 입사되면 두 광파의 광 간섭 무늬(light interference fringe pattern)에 대해 공간적으로 위상 천이된 굴절을 변화가 발생하게 되며, 이러한 굴절율의 변화는 부피 격자(volume grating)로 작용하여 광 메모리 소자로서 실시간으로 광 정보를 저장할 수 있어 광 정보 처리, 광 컴퓨팅, 광 뉴럴 네트워크, 광 센서등 다양한 분야에서 많이 연구, 활용되고 있다.

한편, 직렬 처리 특성을 갖는 기존 컴퓨터의 단점을 극복하기 위해 기존의 전자적인 원리에 바탕을 둔 새로운 컴퓨팅 원리가 추구되고 있는데, 광의 고속성(high speed: 10⁻¹⁵초), 대용량(large bandwidth: 3x10¹²Hz), 병렬 처리(parallel processing) 능력을 컴퓨터에 응용하는 광 컴퓨팅이 차세대 컴퓨팅 시스템으로 주목을 받고 있다.

본 논문에서는 렌즈의 푸리에 변환 특성과 속외 4광파 혼합(degenerate four-wave mixing:DFWM)메카니즘에 의해 광굴절 매질에서 발생하는 위상 공역파의 코릴레이션 성질을 이용하여 광 연산기를 구현하고자 한다.

II. 광 연산 작용을 수행하는 공간 광 신호 상관기

그림 2-1은 푸리에 변환 렌즈와 광굴절 매질이 사용된 4-f 시스템의 공간 광 신호 상관기 구성도이다. 각 렌즈 앞 축점거리 평면에서의 공간적 전계 특성은 식 (2-1)과 같이 주어진다.

$$E_j(x, y, z) = A_j(x, y, z) e_j \exp[i(k_j z - \omega t)] + c.c. \quad (2-1)$$

단, $j = 1, 2, 3, 4$

$$A_{1,4}(x, y, 0) \equiv U_{1,4}(x, y), \quad A_2(x, y, 4f) \equiv U_2(x, y)$$

e_j : 편광 벡터

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 = 0$$

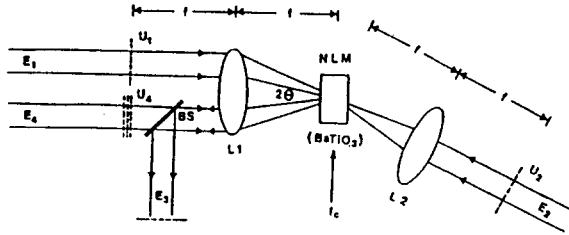


그림 2-1 4-f 시스템의 공간 광 신호 상관기 구성도

입사하는 두 펄스빔 E_1 과 E_2 는 서로 수직으로 편광되어 상반된 방향으로 진행하며, 신호빔 E_4 와는 평행하다. 입력 패턴 U_j 는 콘볼루션 또는 코릴레이션될 입력 정보를 갖고 있으며, 모두 같은 주파수 ω 의 평행광으로 조사된다고 가정한다.

렌즈의 초점 평면에 비선형 광굴절 매질을 두면, 매질 내에서 축퇴된 세 입사빔의 혼합에 의해 다음과 같은 위상 공역파 출력 전계 진폭 A_3 을 얻는다.

$$A_3 \propto U_1(-x, -y) * U_2(-x, -y) \textcircled{*} U_4(-x, -y) \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서 * 과 $\textcircled{*}$ 은 각각 콘볼루션과 코릴레이션을 나타낸다.

그러므로, 판독빔 입력 U_2 로 δ -함수 또는 점광원을 사용하면 기록빔 입력 U_1 과 U_4 사이의 공간적 코릴레이션 관계를 얻는다.²

$$A_3 \propto U_1 \textcircled{*} U_4 \quad (2-3)$$

III. 코릴레이션 메카니즘에 의한 광학적 연산

DFWM에 의해 발생하는 위상 공역파는 렌즈의 퓨리에 변환 특성때문에 두 입력 기록빔 사이에 식(2-3)과 같은 코릴레이션 관계를 갖게 된다. 이것은 BaTiO₃ 광굴절 매질 내 퓨리에 영역에서 두 입력 관계의 곱을 의미하므로 광 연산 처리기를 구현하기 위한 두 입력의 코딩 패턴이 빔 결합(beam coupling)에 중요하게 작용한다.

최근까지 광 논리 게이트나 광 정보 처리에 많이 이용되어온 Shadow-casting형 코딩 방법은 거의 모든 시스템이 입력을 겹치는 공간적 선형 처리 과정인 관계로 사각형 형태의 화소들로 코딩하여도 문제가 없었으나, 본 논

문에서의 BaTiO₃ 비선형 광굴절 매질을 이용한 광 논리, 광 연산 시스템에서는 사각형 형태의 코딩 방식은 고주파 성분이 많아 퓨리에 영역에서 빔결합에 어려울 뿐만 아니라 비효율적이므로 Airy ring 형태의 퓨리에 변환 패턴을 갖는 원형태의 화소로 바꾸었다.³

III-1. 광 이진 병렬 곱셈기

DFWM에 의한 공간 광 신호 상관기의 코릴레이션 성질을 이용하여 이진 변수에 대한 입력 비트들의 코딩 패턴을 찾아내면 캐리 메카니즘이 고려되지 않은 곱셈연산을 병렬로 수행할 수 있다. 이진 입력 '0'과 '1'에 대한 코딩 패턴은 '0'에 대해서는 light-off(opaque), '1'에 대해서는 light-on (transparent)로 결정된다.⁴

예를들어, (3*3)비트 입력에 대한 병렬 이진 곱셈 연산 과정을 그림 3-1에 나타내었다.

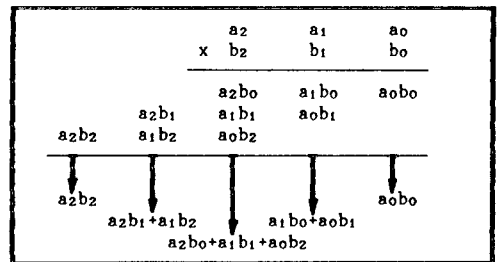
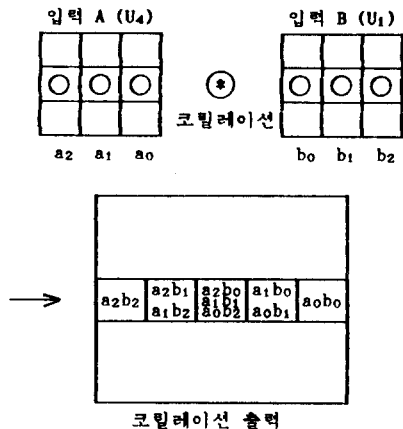


그림 3-1 (3 * 3)비트 병렬 이진 곱셈 연산 과정

그림 3-2는 곱셈 연산을 할 수 있는 2가지 형태의 입력 코딩 패턴과 각각의 예상되는 코릴레이션 출력들을 보여준다.

경우 (I)



$$C_k = \sum_{i=k-(n-1)}^n a_i b_{k-i}$$

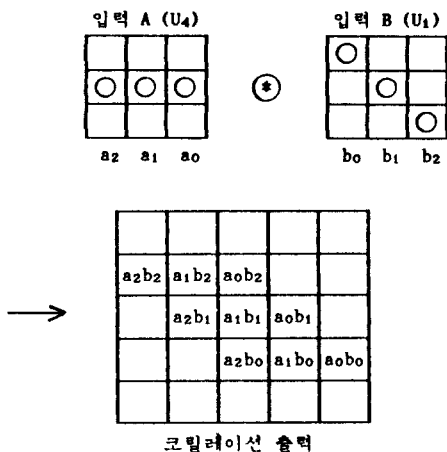
이다.

III-2. 광학적 행렬 계산

일반적으로, p행 q열로 구성된 A행렬과 r행 s열로 구성된 B행렬 사이의 곱(multiplication)은 qr 일때만 계산이 가능하며, 그결과는 p행 s열의 C행렬이 된다.
 주,

$$C = A \cdot B \quad (3-2)$$

경우 (II)



단,
$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{q=r} a_{ik} b_{kj} \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, p \\ j=1, 2, \dots, s \end{matrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1q} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2q} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pq} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1s} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2s} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{r1} & b_{r2} & \dots & b_{rs} \end{bmatrix}$$

간단한 예로서 각각 2행 2열의 정방행렬인 A, B 행렬에 대한 입력 코딩 형태는 그림 3-3과 같은 방식으로 주어진다.

그림 3-2 (3*3)비트 곱셈 연산의 코릴레이션 출력

$$G^{n(\text{bits})} (\text{출력}) = \sum_{k=0}^{n-1} C_k 2^k \quad (3-1)$$

단, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$ 이다.

만약에 $k \leq (n-1)$ 이면

$$C_k = \sum_{i=0}^n a_i b_{k-i}$$

이고, $k > (n-1)$ 이면

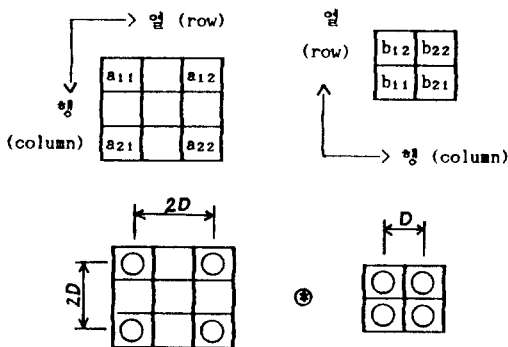


그림 3-3 행렬 계산을 위한 입력 코딩 패턴

위 A, B 행렬에 대한 코딩 입력을 각각 그림 2-1의 4-f 공간 광신호 상관기의 신호입 입력(U_4), 기준입 입력(U_1)으로 사용하면 축회 4광파 혼합 메카니즘에 의해 발생하는 위상공역파의 코릴레이션 출력에 그림 3-4와 같은 행렬 계산된 결과를 얻는다.

$a_{11}b_{21}$	$a_{11}b_{11}$	$a_{12}b_{21}$	$a_{12}b_{11}$
$a_{11}b_{22}$	$a_{11}b_{12}$	$a_{12}b_{22}$	$a_{12}b_{12}$
$a_{21}b_{21}$	$a_{21}b_{11}$	$a_{22}b_{21}$	$a_{22}b_{11}$
$a_{21}b_{22}$	$a_{21}b_{12}$	$a_{22}b_{22}$	$a_{22}b_{12}$

	C_{11}	
	C_{12}	
	C_{21}	
	C_{22}	

여기서,

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}$$

$$C_{11} = a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21}$$

$$C_{12} = a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22}$$

$$C_{21} = a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21}$$

$$C_{22} = a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22}$$

그림 3-4 행렬 계산에 대한 예상되는 코릴레이션 출력

일반적으로 p행 q열의 A행렬과 r행 s열의 B행렬에 대한 코딩 패턴은 B행렬 원소들간의 간격을 D라고 할때 A행렬의 행과 열 원소들간의 간격은 각각 $(r \times D)$ 와 $(s \times D)$ 로 주어진다.

*Example,

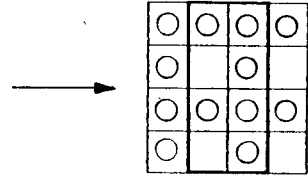
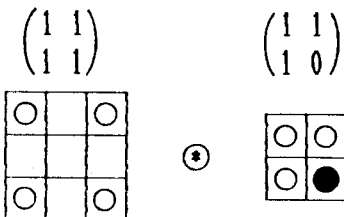


그림 3-5 행렬 계산을 보여주기 위한 Example

III-3. 다중 논리 제어함수에 의한 반 가산기/감산기

광 이진 반 가산기/감산기는 광 컴퓨터를 구성함에 있어서 CPU의 기본적인 부분으로 식(3-3)과 같은 논리 동작으로 구성된다.

$$S_i = a_i \oplus b_i \quad : \text{Sum}$$

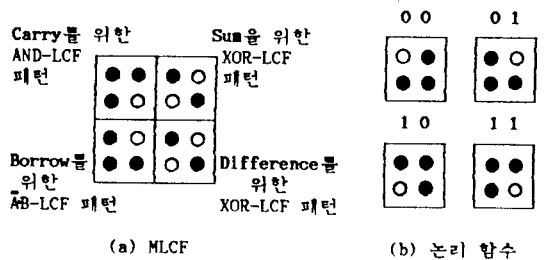
$$C_{i+1} = a_i \cdot b_i \quad : \text{Carry} \tag{3-3}$$

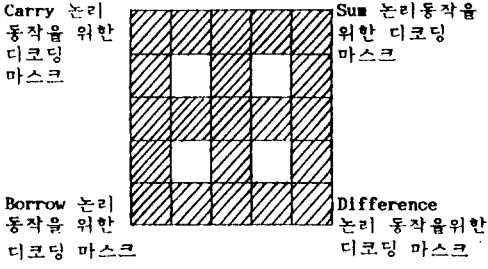
$$D_i = a_i \oplus \bar{b}_i \quad : \text{Difference}$$

$$B_{i+1} = \bar{a}_i \cdot b_i \quad : \text{Borrow}$$

이를 실현하기위해 그림 2-1의 공간 광 신호 상관기의 입력 U_4, U_1 으로 그림 3-6(a)와 같이 논리 게이트를 배열하여 다중 논리 제어함수(multiple logic control function: MLCF)를 구성하고, 원하는 출력을 얻기 위해 출력단에 그림 3-6(c)와 같은 다중 디코딩 마스크(multiple decoding mask:MDM)를 사용하면 광 이진 반가산기/감산기를 광학적으로 구성할 수 있다.

두 이진 입력 00, 01, 10, 11 에 대해 예상되는 코릴레이션 출력은 그림 3-7과 같다.





(c) 다중 디코딩 마스크 (MDM)

그림 3-6 반가산기/감산기를 구성하기 위한 MLCF(a), 논리합수(b), MDM(c)

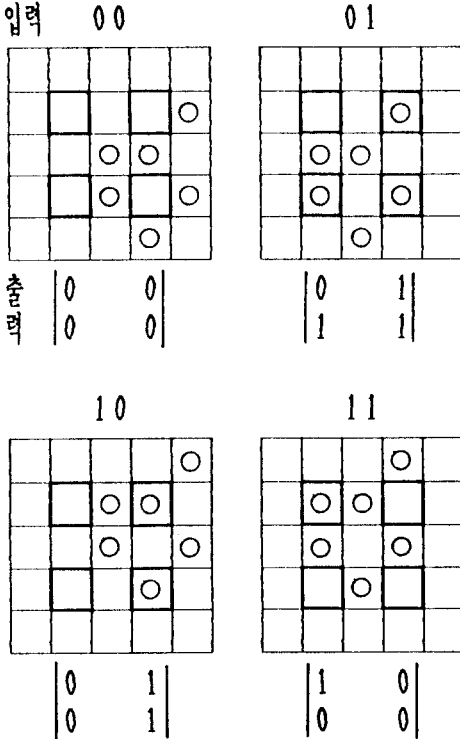
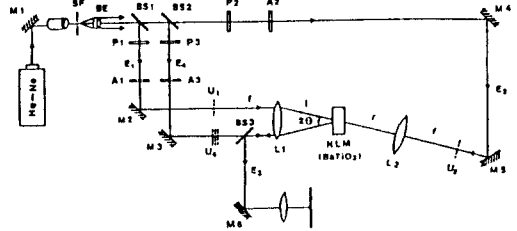


그림 3-7 광이진 반가산기의 예상되는 코릴레이션 출력

IV. 실험 및 결과

그림 4-1은 속의 4광파 혼합 메카니즘에 의한 위상공역 파의 코릴레이션 성질을 이용하여 광학적 연산을 수행할 수 있는 연산 처리기의 구성도이다.



단, He-Ne:사용된 레이저(633nm), SF(spatial filter):광 공간 여파기, BE(beam expander):빔 확장기, BS's(beam splitter):빔 분리기, M's(mirror):거울, P's(polarizer):빔 편광기, A's(attenuator):빔 감쇠기, L's(lens):프리미어 인한 렌즈, U's:입력 패턴

그림 4-1 DFWM 메카니즘을 사용하는 광 연산 처리기의 구성도

실험에 사용한 비선형 광굴절 매질은 Sanders Co.에서 제작한 BaTiO₃ 단결정으로써 크기는 7.8 x 5.5 x 5.1 mm이며, 광축은 7.5 x 5.5 mm 면에 대각선으로 서 있다. 이 결정은 상온에서 tetragonal symmetry 4 mm 구조이며, 다소 반응 속도는 늦으나 외부 전계를 가하지 않아도 큰 전기 광학 계수($r_{42}=820 \times 10^{-12}$ m/V)를 갖는다. 또한 ordinary 편광시 결정의 굴절율(n_o)은 2.41이고, extraordinary 편광시 결정의 굴절율(n_e)은 2.36이다. 광원으로는 파장이 633 nm이며 출력 파워가 5.6mW/cm²인 He-Ne 레이저(NEC Co.)를 사용하였다.

DFWM 메카니즘의 위상 정합(phase matching)조건인 $k_1+k_2=k_3+k_4=0$ 을 만족하도록 하였으며, 사용된 He-Ne 레이저의 대략 20cm 되는 가-간섭성 길이(coherence length)를 고려해서 결정에 입사되기 전까지 두 기록빔 사이의 경로차를 2~3cm 이내로 유지하였으며, 그림 5-1 처럼 판독빔은 오히려 가-간섭성 길이보다 더 길게 하였다. 그 이유는 δ -함수를 사용하여 기록된 정보에 영향을 미치지 않고 단지 읽어내는 역할만 하도록 하였기 때문이다. 또, 기록된 정보를 정확히 읽어내기 위해서 부피 격자 형태로 저장된 정보의 공간 주파수를 모두 읽어 낼 수 있는 판독빔의 크기를 사용하였으며, 실험에 사용한 U₁, U₄ 코딩 마스크는 필름으로 제작하였다.

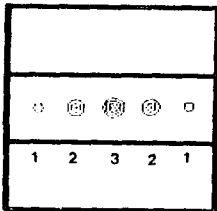
(가) 광 이진 병렬 곱셈기에 대한 실험 결과

원형 화소들간의 입력정보가 올바른 논리 동작을 할 수 있도록 원형 화소의 반경을 $r=0.5 \text{ mm}$ 로 했으며 인접 화소간의 중심에서의 간격을 2.95 mm 로 하여 서로 중첩되지 않도록 하였다.

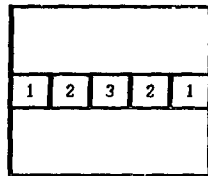
사진 4-1(a)는 (3×3) 입력 비트에 대한 코릴레이션 실험으로 모든 화소에 빛이 투과되었을때의 코릴레이션 결과이며, 사진 4-1(b)는 $111(7) \times 101(5)$ 와 같은 입력이 사용되었을때의 실험 결과이다.

사진에서 각 코릴레이션 결과들의 숫자는 빔의 상대적 세기비를 의미하며 또한 출력단에 각 위치에 대해 빔세기비 \times 웨이트(weight)를 처리할 수 있는 광 검출기가 포함된 전자적인 시스템이 도입되면 입력에 대한 정확한 이진 곱셈 결과를 얻을 수 있다.

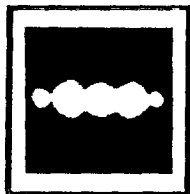
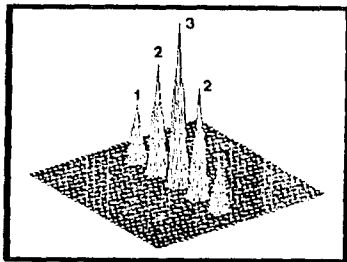
$$\text{즉, } (1 \times 16) + (1 \times 8) + (2 \times 4) + (1 \times 2) + (1 \times 1) = 35$$



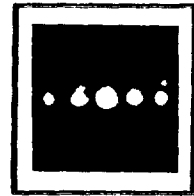
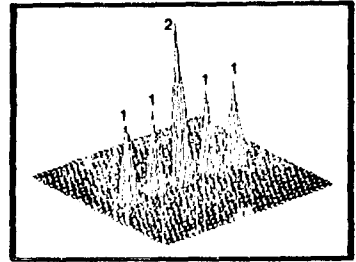
코릴레이션 결과의 등고선



빔의 세기비



(a) 이진 곱셈 연산을 위한 코릴레이션 실험 결과



(b) 111 x 101 곱셈 연산에 대한 실험 결과

사진 4-1 이진 곱셈기에 대한 실험 결과

(나) 광학적 행렬 계산에 대한 실험 결과

그림 3-5와 같은 두 입력을 사용했을 경우, 출력단에서 발생하는 (4×4) 위상공액파의 코릴레이션 출력은 사진 4-2와 같으며, 출력단에서 2번째 열과 3번째 열에 있는 화소들만 통과시키는 디코딩 마스크를 사용하여 빔을 모으면 각각 (2, 1, 2, 1)이 되는 행렬 계산 결과를 얻게 된다

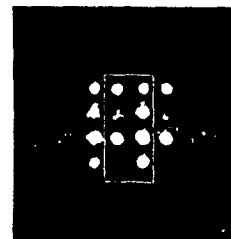


사진 4-2 이진 행렬 계산에 대한 실험 결과

(다) MLCF를 이용한 반가산기/감산기의 실험 결과

그림 2-1에서 U_4 와 U_1 의 입력으로 그림 3-6의 (a)와(b)를 사용하여 DFWM 메카니즘에 의해 발생한 실험 결과는 사진 4-3과 같다. 코릴레이션 결과에 대한 이해를 돕기 위해 출력단에서 MDH를 사용하지 않았다. 만약에 출력단에 Carry, Sum, Borrow, Difference 처리 동작을 위한 (5 * 5) MDH를 사용하면 00, 01, 10, 11에 대한 이진 덧셈과 뺄셈에 대한 결과를 얻게된다.

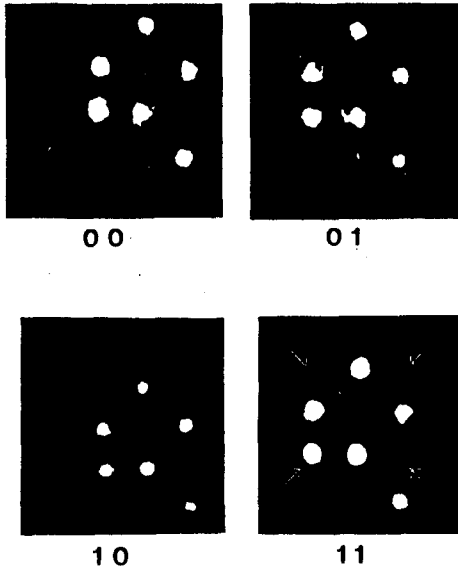


사진 4-3 이진 반가산기/감산기의 실험 결과

V. 결 론

본 논문에서는 렌즈의 퓨리에 변환 특성과 속도 4광파 혼합에 의해 $BaTiO_3$ 단결정으로부터 발생하는 위상 공역 파의 코릴레이션 성질을 이용하여 이진 덧셈, 뺄셈, 곱셈, 행렬 계산을 광학적으로 수행할 수 있는 일반적인 연산 처리기를 제시하였다.

본 논문에서 제안된 광 연산 처리기를 구성하기 위해서 기존에 입력으로 사용되던 사각형 형태의 화소들을 퓨리에 영역에서 빔결합을 고려하여 원 형태의 화소들로 바꾸어 코딩 문제를 해결하였으며, 올바른 연산 동작을 수행하기 위해 입력 코딩 형태들을 변형 시켰다. 그리고, 입력 원형 화소들의 반경은 퓨리에 영역에 생기는 Airy ring의 주파수 차수(frequency order)들 사이의 간격과 관련되는 변수로 반경이 작을수록 빔결합이 쉬웠다.

본 논문에서 제안한 광 연산 & 논리 처리기는 변형된 입력 코딩 형태에 따라 다양한 응용 범위를 갖고 있다.

V. 참고문헌

1. J. Feinberg, D. Heiman, " photorefractive effects and light - induced charge migration in $BaTiO_3$ ", J. Appl. phys., Vol.51, pp 1297 - 1305, 1980
2. Y. Li, G. Eichmann, " optical computing using hybrid encoded shadow casting ", J. Appl. opt., Vol. 25, No.16, pp 2636 - 2638
3. 엄순영, 이권연, 권원현, 박한규, " Implementation of the optical logic gates using the correlation-technique of optical phase conjugation ", 한국통신학회 1989년 춘계 학술 발표회 논문집, Vol.8, No.1, 1989
4. Pochi Teh, " Photorefractive nonlinear optics and optical computing ", J. opt. Eng., Vol.28, No.4, pp 328 - 343, 1989