

論文2003-40SD-3-3

# BaTiO<sub>3</sub>의 특성을 이용한 광굴절 결합 변환 상관기의 신호 대 잡음비 개선

## (Improvement of the Signal-to-Noise Ratio of Photorefractive Joint Transform Correlator using Characteristics of BaTiO<sub>3</sub>)

孔明述\*, 徐東煥\*, 申昌睦\*, 曹圭甫\*, 金喆洙\*\*, 金秀重\*

(Myung-Sool Gong, Dong-Hoan Seo, Chang-Mok Shin, Kyu-Bo Cho, Cheol-Su Kim, and Soo-Joong Kim)

### 요 약

전통적인 광굴절 결합 변환 상관기는 원하는 상관 출력을 얻기 위해 입력되는 신호 대 펌프빔의 세기비가 2광파 혼합의 전달함수가 포화될 정도로 충분히 커야 한다. 그 결과 입력영상에 잡음이 있을 경우 상관 출력의 신호 대 잡음비가 떨어진다. 본 논문에서는 BaTiO<sub>3</sub>의 특성을 이용하여 광굴절 결합 변환 상관기의 신호 대 잡음비 개선 방법을 제안하였다. 입력빔의 세기비를 작게 하여 에너지 전달이 포화되지 않도록 하고, 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각도를 크게 하여 매질내에서의 두 빔의 유효 상호작용 길이가 짧아지도록 하였다. 그 결과 고주파 영역의 이득은 줄어드는 반면 저주파 영역은 2광파 혼합의 포화이득을 가지게 되어 입력영상에 잡음이 있는 경우 신호 대 잡음비가 개선되었고, 입력빔의 세기비가 작아져 실제 구현이 용이해졌다.

### Abstract

In the conventional photorefractive joint transform correlator(PRJTC), the intensity ratio of input signal-to-pump beam should be large enough to saturate two-beam coupling transfer function to obtain a desired correlation result. As a result, the signal-to-noise ratio(SNR) of correlation result is decreased in a noisy input image. In this paper, we propose the improved method for increasing the SNR of the PRJTC by using the characteristics of BaTiO<sub>3</sub>. We stop the energy transfer saturating by low intensity ratio of input beam and realize a short length of effective interaction in BaTiO<sub>3</sub> by making large incident angle of the signal beam. So the gain in high frequency area is decreased and the gain in low frequency area comes up to the saturation gain of the beam coupling transfer function. Therefore the SNR is improved in noisy input image and the PRJTC can be easily realized by low intensity ratio of input beam.

**Keywords** : Joint transform correlator(JTC), photorefractive material, two-beam coupling, signal-to-noise ratio(SNR).

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터學部  
(School of Electrical Engineering & Computer  
Science, Kyungpook Nat'l Univ.)

(School of Computer & Electronic Eng., Kyongju  
University)

接受日字:2002年1月11日, 수정완료일:2003年3月3日

\*\* 正會員, 慶州大學校 컴퓨터電子工學部

## I. 서 론

광굴절 매질은 입사되는 빛의 세기에 의해 매질내의 굴절률이 국부적으로 변하는 광굴절 효과<sup>[1]</sup>(photo-refractive effect)를 가지는 소자로 영상의 저장, 재생 및 삭제 등의 실시간 처리가 가능하므로 이를 광 신호 처리에 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2-5]</sup>. 대표적인 광굴절 매질로는 BaTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, Bi<sub>12</sub>SiO<sub>2</sub>O (BSO), Bi<sub>12</sub>GeO<sub>2</sub>O(BGO) 등의 비선형 매질과 GaAs, InP 등의 반도체 매질이 있는데 이들 중 BaTiO<sub>3</sub>와 LiNbO<sub>3</sub>는 전기 광학 계수(electro-optic coefficient)가 높고, 저출력 레이저로도 동작이 가능하므로 광 신호처리에 널리 사용되고 있다. 광굴절 매질을 이용하는 광 신호처리 분야는 영상 증폭, 영상의 특징점 추출, 홀로 그래픽 메모리 및 광 상관기 등이 있으며 최근에는 패턴인식을 위한 광굴절 상관기의 구현에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

Weaver 등<sup>[6]</sup>에 의해 제안된 결합 변환 상관기(joint transform correlator; JTC)는 입력영상과 기준영상을 동시에 입력평면에 두고 실험함으로써 전통적인 4-f 상관기의 광축정렬 문제를 해결하였으며 실시간 처리에 유리하다는 장점이 있다. 이러한 결합 변환 상관기를 광굴절 매질의 2광파 혼합<sup>[3-5]</sup>(two-beam coupling) 및 4광파 혼합<sup>[3,4]</sup>(four-wave coupling)의 비선형 특성을 이용하여 구현하는 방법들이 제안되었다<sup>[4,5]</sup>. 2광파 혼합은 크기가 다른 신호빔과 펄프빔을 광굴절 매질에 입사시켜 세기가 큰 펄프빔에서 세기가 작은 신호빔으로 에너지가 전달되는 특성을 가지며, 4광파 혼합에 비해 구조가 간단하고 광효율이 우수하다는 장점을 가진다. 그러나 2광파 혼합을 이용한 광굴절 결합 변환 상관기는 원하는 상관 출력을 얻기 위해서 입사되는 두 빔의 세기비가 매우 커야 되므로 실제 구현이 힘들고 역여파 상관기(inverse filter correlator)처럼 동작하므로 잡음이 있는 입력영상의 경우에는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; SNR)가 낮아져 인식이 어렵다는 문제를 가진다.

본 논문에서는 BaTiO<sub>3</sub>의 2광파 혼합 특성을 이용하여 입사되는 신호 대 펄프빔의 세기비를 작게 하고 매질내에서의 두 빔의 유효 상호 작용길이를 짧게 조절함으로써 광굴절 결합 변환 상관기의 신호 대 잡음비를 개선하는 방법을 제안하였다. 동일한 평면에 있는

입력영상과 기준영상을 통과한 신호빔을 푸리에 변환한 후 광굴절 매질에 입사하고, 세기가 작은 펄프빔을 브래그 각도 정합 조건<sup>[7]</sup>을 만족하도록 매질에 입사하면 신호빔의 스펙트럼이 펄프빔으로 전달된다. 매질을 통과한 펄프빔을 푸리에 역변환하면 출력평면에 입력영상과 기준영상의 상관 결과가 나타나게 된다. 이때 매질에 입사되는 신호 대 펄프빔의 세기비를 조절하여 에너지 전달이 포화되지 않도록 하였고, 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각도를 크게 하여 매질내에서의 두 빔의 유효 상호작용 길이를 짧게 하였다. 그 결과 고주파 영역의 이득은 기존의 광굴절 결합 변환 상관기보다 상대적으로 줄어들고 저주파 영역은 동일한 이득을 가지게 되어 입력영상에 잡음이 있는 경우 신호 대 잡음비가 개선되었다.

광 실험은 광굴절 결정 중 전기광학 계수가 매우 크고, 2광파 혼합이 잘 일어나는 BaTiO<sub>3</sub>를 사용하였다. 컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 통하여 제안한 광굴절 결합 변환 상관기가 기존의 광굴절 결합 변환 상관기에 비해 실제 구현이 용이하며 입력영상에 잡음이 있는 경우 신호 대 잡음비가 개선됨을 확인하였다.

## II. 광굴절 매질의 특성

### 1. 광굴절 효과

광굴절 효과란 비선형 매질에 빛이 입사되었을 때 빛의 세기 패턴에 따라 매질내의 굴절률이 변화되어 굴절격자가 형성되는 현상을 말한다. 광굴절 효과에 의해 형성된 굴절격자는 암실에서 오랜 동안 그 상태가 유지되므로 광 정보의 저장이 가능하고, 강하고 균일한 빛을 비추면 저장된 정보를 삭제할 수 있으므로 이 매질을 실시간 광 정보처리와 동적 광 메모리 등에 이용할 수 있다.

전기 광학적 매질 즉 광굴절 매질에 빛이 입사되기 전에는 전자들과 이온들이 전기적으로 중성을 이루고 있으므로 매질 내에 공간 전하장이 존재하지 않는다. 그러나 단일 파장의 두 평면파를 입사시키면 간섭세기 패턴이 매질내에 형성된다. 이때 밝은 부분에서 불순물 준위의 전자가 에너지를 얻어 전도대로 여기되고, 여기된 전자들은 평형을 이루기 위해 어두운 부분으로 확산된다. 이러한 공간 전하 분포는 포아송(Poisson) 방정식에 의해 공간 전하장을 형성한다. BaTiO<sub>3</sub> 단결정의

경우에는 외부에서 전기장을 가하지 않아도 확산에 의해서 전하의 공간적 분포가 달라지므로 공간 전하장이 유도된다. 이 공간 전하장은 선형 전기광학 효과(Pockels effect)에 의해 매질의 굴절률을 변화시킨다. 이렇게 매질의 굴절률이 변화되는 효과를 광굴절 효과라 한다.

2. 2광파 혼합

2광파 혼합은 광굴절 매질에 가간섭적인 두 빔이 입사될 때 광굴절 효과에 의해 빔세기가 큰 펄스빔에서 세기가 작은 신호빔으로 에너지가 전달되어 신호빔이 증폭되는 현상이다. 2광파 혼합에 대한 기본 구성도는 <그림 1>과 같다. 여기서  $K(=k_2 - k_1)$ 는 광굴절 매질에 기록되는 광굴절 격자의 파벡터(wave vector)이고,  $\beta$ 는 K와 매질의  $+c$ 축사이의 각도이다.

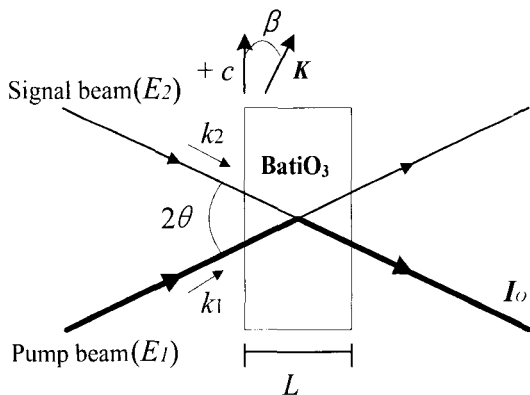


그림 1. 2광파 혼합의 기본 구성도  
Fig. 1. Schematic configuration of two-beam coupling.

광굴절 매질에 입사되는 두 빔의 전장은

$$E_i = A_i \exp[j(k_i \cdot r - \omega t)] + c.c., \quad i=1,2 \quad (1)$$

과 같다. 여기서  $A_i$ 는 파의 진폭이고,  $\omega$ 는 각 빔이 가지는 주파수이며,  $k_i$ 는 각 빔이 진행하는 방향의 전파 벡터(propagation vector)이다.  $r$ 은 직각좌표의 성분들로 나타나는 위치벡터이고,  $c.c.$ 는 복소공액함수(complex conjugator)이다. 매질에 입사되는 두 빔이 이루는 각  $2\theta$ 은 2광파 혼합에 의해 출력되는 빔의 세기가 가장 강하게 되는 브래그 조건이 만족되도록 둔다. 매질내에서 두 빔의 간섭세기는

$$I = |E|^2 = |E_1 + E_2|^2 \quad (2)$$

와 같이 된다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하여 정리하면

$$I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1^* A_2 \exp(-jK \cdot r) + A_1 A_2^* \exp(jK \cdot r) \quad (3)$$

과 같이 된다. 식 (3)은 매질내에서 광 에너지의 공간적 변화를 나타내며, 이러한 간섭세기 패턴에 의해 광 전하가 생성 및 재분배된다. 그 결과 매질내에 공간 전하장이 형성되며, 이 전하장은 선형 Pockels 효과에 의해 매질내에 굴절격자를 유도한다. 이러한 격자는 간섭세기 패턴에 비해 상대적인 위상차를 가지며, 기본성분을 포함한 격자의 굴절률은

$$n = n_0 + \frac{n_1}{2} \exp(j\phi) - \frac{A_1^* A_2}{I_0} \exp(-jK \cdot r) + c.c. \quad (4)$$

와 같다. 여기서  $I_0$ 는 매질에 입사되는 빔의 총세기,  $n_0$ 는 매질에 빛이 존재하지 않을 때의 굴절률이고,  $\phi$ 는 기록된 굴절률 패턴과 간섭세기 패턴의 공간 위상차이다.  $n_1$ 은 격자 간격과 격자 방향 및 매질의 전기 광학적인 성질에 의존한다.

광굴절 매질내에서의 두 빔의 결합도를 알아보기 위해

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} n^2 E = 0 \quad (5)$$

와 같은 Helmholtz 결합 방정식을 이용한다. 여기서  $E = E_1 + E_2$ 이고,  $c$ 는 광속도이다. 만약 진폭의 완만한 변화만 고려하여 2차 미분성분과 매질내에서의 흡수를 무시한다면 식 (5)는

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1 &= -j \frac{\pi n_1}{\lambda I_0 \cos \theta} e^{-j\phi} A_1 A_2^* A_2 \\ \frac{d}{dz} A_2 &= -j \frac{\pi n_1}{\lambda I_0 \cos \theta} e^{j\phi} A_1^* A_2 A_1 \end{aligned} \quad (6)$$

과 같이 된다. 여기서  $\lambda$ 는 두 빔의 파장이다. 식 (6)을 풀면

$$\begin{aligned} A_1(z) &= A_1(0) \left[ \frac{1+m}{1+m \exp(\Gamma L_{eff})} \right]^{1/2} \\ A_2(z) &= A_2(0) \left[ \frac{1+m}{1+m \exp(-\Gamma L_{eff})} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 여기서  $\Gamma$ 는 광굴절 매질의 결합계수로

$$\Gamma = \frac{2\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \sin \theta \quad (8)$$

과 같이 되고,  $m$ 은 신호빔 대 펌프빔의 세기비고,  $L_{eff}$ 는

$$L_{eff} \cong \frac{L}{\cos \beta} \quad (9)$$

와 같이 정의되는 매질의 유효 상호작용 길이로서 <그림 1>의 광굴절 격자의 파벳터  $K$ 와 매질의  $+c$ 축에 의해 결정된다. 즉 신호빔( $E_2$ )와 매질의 표면이 이루는 각을 크게 하면 유효 상호작용 길이를 짧게 할 수 있다. 식 (8)에서  $n_1$ 은 광굴절 격자간격과 격자방향 및 매질의 전기 광학적인 성질에 의존하며

$$n_1 = (1/2) n^3 r_{eff} E_{sc} \quad (10)$$

과 같이 정의된다. 식 (10)을 식 (8)에 대입하여 정리하면

$$\Gamma = \frac{\omega n^3}{2c} \frac{E_{sc} r_{eff}}{\cos \theta} \quad (11)$$

과 같이 된다. 여기서  $\omega$ 는 각 빔의 주파수,  $c$ 는 광속도,  $n$ 은 빔의 편광방향에 따라 주어지는 매질의 굴절률,  $r_{eff}$ 는 유효 Pockels 계수이고,  $E_{sc}$ 는 선형 Pockels 효과에 의해 생성된 공간 전하장이다.

전기 광학 계수인  $r_{eff}$ 는 빔이 정상빔(ordinary beam)일 때는

$$r_{eff} = n_o^4 r_{13} \cos \beta \quad (12)$$

와 같고, 이상빔(extraordinary beam)일 때는

$$r_{eff} = n^{-4} \cos \beta [n_o^4 r_{13} (\cos 2\theta - \cos 2\beta) + 4n_e^2 n_o^2 r_{42} \sin^2 + n_e^4 r_{33} (\cos 2\theta + \cos 2\beta)] \quad (13)$$

과 같이 표현된다. 여기서  $n_o$ 는 정상빔일 때 매질의 굴절률,  $n_e$ 는 이상빔일 때의 굴절률이고,  $r_{13}$ ,  $r_{33}$ ,  $r_{42}$ 는 매질이 가지는 각 방향에서의 전기 광학 계수이다. 광굴절 매질의 2광파 혼합은 식 (7)에 의해 세기가 큰 빔의 스펙트럼을 세기가 작은 빔으로 전달한다. 따라서 세기가 큰 빔에 입력영상과 기준영상을 결합하여 두고 푸리에 변환하여 매질에 입사하면 입력평면의 스펙트

럼이 세기가 작은 빔으로 전달된다. 매질을 통과한 작은 빔을 푸리에 역변환하면 입력영상과 기준영상의 상관 결과가 나타나므로 광굴절 매질을 이용한 결합 변환 상관기(joint transform correlator; JTC)의 구현이 가능하다.

### III. 결합 변환 상관기

#### 1. 전통적인 결합 변환 상관기

JTC 시스템은 4-f 상관시스템의 광축정렬 문제를 해결하기 위하여 입력평면에 기준영상과 입력영상을 함께 두어 푸리에 변환한 후 제곱법칙 검출기(square-law detector)를 이용하여 상관을 얻는 시스템이며, 구성도는 <그림 2>와 같다. 여기에서 SLM은 입력평면을, 렌즈 L는 푸리에 변환렌즈를, P는 출력평면을 나타내며,  $f$ 는 렌즈의 초점거리이다.

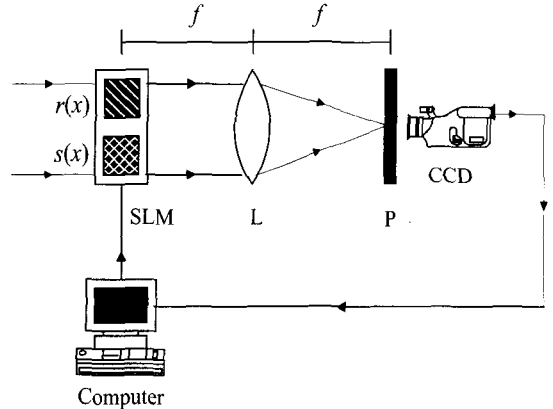


그림 2. 결합 변환 상관기(JTC)의 구성도

Fig. 2. Schematic configuration of joint transform correlator.

<그림 2>에서  $s(x)$ 는 입력영상이고  $r(x)$ 는 기준영상이며 입력평면의 중심에서  $\pm x_0$ 만큼 떨어진 위치에 놓인다. 이때 결합 입력평면은

$$f(x, y) = s(x - x_0, y) + r(x + x_0, y) \quad (14)$$

로 표현되며, 렌즈 L에 의해서 푸리에 변환되면

$$F(a, \beta) = |S(a, \beta)| \exp[j\phi_s(a, \beta)] \exp(-jx_0 a) + |R(a, \beta)| \exp[j\phi_R(a, \beta)] \exp(jx_0 a) \quad (15)$$

와 같다. 여기서  $\phi_s$ 와  $\phi_R$ 은 입력영상과 기준영상의

위상을 나타낸다. 출력평면 P에 놓인 CCD 카메라에서의 출력은

$$\begin{aligned}
 U(\alpha, \beta) = & |F(\alpha, \beta)|^2 = |S(\alpha, \beta)|^2 + |R(\alpha, \beta)|^2 \\
 & + |S(\alpha, \beta)| \exp[j \phi_S(\alpha, \beta)] |R(\alpha, \beta)| \\
 & \exp[-j \phi_R(\alpha, \beta)] \exp(-j 2 x_0 \alpha) \quad (16) \\
 & + |S(\alpha, \beta)| \exp[-j \phi_S(\alpha, \beta)] |R(\alpha, \beta)| \\
 & \exp[j \phi_R(\alpha, \beta)] \exp(j 2 x_0 \alpha)
 \end{aligned}$$

과 같이 표현되며, 식 (16)의 광 세기 함수는 다시 SLM으로 입력되어 렌즈 L에 의해 푸리에 역변환된다. 이때 출력 상관 평면에서의 광 분포 함수는

$$\begin{aligned}
 u(x, y) = & s \star s + r \star r \\
 & + s \star r \star \delta(x + 2x_0, y) + r \star s \star \delta(x - 2x_0, y) \quad (17)
 \end{aligned}$$

과 같다. 여기서  $\star$ 는 상관자(correlation operator)를 \*는 상승자(convolution operator)를 뜻한다. 식 (17)에서 출력평면의 중심에 입력영상과 기준영상의 자기 상관 성분이 나타나며  $\pm 2 x_0$ 만큼 떨어진 위치에 상호 상관 성분이 나타난다. 전통적인 JTC 시스템에서 제곱 법칙 검출기의 출력을 문턱치하면 기준영상과 입력영상의 위상성분만을 이용한 상관이 가능하므로 빛의 효율성, 식별능력(discrimination ability)이나 침투 대 잡음비 (peak-to-noise ratio: PNR) 등이 향상된 비선형 JTC 를 구현할 수 있다<sup>[8]</sup>.

2. 비선형 결합 변환 상관기

전통적인 JTC에서 제곱 법칙 검출기의 출력인 식 (16)의  $U$ 를 문턱치하는 함수를

$$g_k(U) = \begin{cases} U^k, & U \geq 0 \\ -|U|^k, & U < 0 \end{cases} \quad (18)$$

로 둔다. 이때  $k$ 값은 비선형성의 차수를 나타내며,  $k$ 가 0에서 1사이 값을 가지는 경우 비선형 JTC라 한다. 식 (18)에서  $g(U)$ 는

$$\begin{aligned}
 g(U) = & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(i\omega U) d\omega \\
 = & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp\{i\omega [ |S(\alpha, \beta)|^2 \\
 & + |R(\alpha, \beta)|^2 ] \times \exp\{j 2\omega [ S(\alpha, \beta) |R(\alpha, \beta)| \\
 & \cos[2 x_0 \alpha + \phi_S(\alpha, \beta) + \phi_R(\alpha, \beta)] \} d\omega \quad (19)
 \end{aligned}$$

와 같은 지수함수 항은

$$\begin{aligned}
 \overline{\exp(j \cos \phi)} = & \sum_{v=0}^{\infty} \varepsilon_v (j)^v J_v(a) \cos v \phi \\
 \begin{cases} \varepsilon_v = 1, & v = 0 \\ \varepsilon_v = 2, & v \neq 0 \end{cases} \quad (20)
 \end{aligned}$$

과 같은 Jacobian-Anger 함수를 사용하여 전개가 가능하다. 여기서  $J_v$ 는 제1종 Bessel 함수이다. 식 (19)의 두 번째 지수함수 항을 식 (20)을 사용하여 전개하면

$$\begin{aligned}
 g(U) = & \sum_{v=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_v}{2\pi} (j)^v \int G(\omega) \\
 & \exp\{j\omega [ |S(\alpha, \beta)|^2 + |R(\alpha, \beta)|^2 ] \\
 & \times J_v [ 2\omega |S(\alpha, \beta)| |R(\alpha, \beta)| ] \\
 & \cos[2 v x_0 \alpha + v \phi_S(\alpha, \beta) - v \phi_R(\alpha, \beta)] \quad (21)
 \end{aligned}$$

과 같다. 따라서 문턱치된 식 (16)의  $U$ 는 무한한 조화 함수의 합으로 나타남을 알 수 있다. 식 (18)을 푸리에 변환하면

$$G_k(\omega) = \frac{2}{(i\omega)^{k+1}} \Gamma_m(k+1) \quad (22)$$

와 같고, 여기서  $\Gamma_m$ 은 수학적인 감마 함수를 나타낸다. 이 식을 식 (21)에 대입하여 전개하면

$$\begin{aligned}
 g_k(U) = & \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\varepsilon_v \Gamma_m(k+1) [2 |R(\alpha, \beta)| |S(\alpha, \beta)|]^k}{2^k \Gamma_m(1 - \frac{v-k}{2}) \Gamma_m(1 + \frac{v+k}{2})} \\
 & \times \cos[2 v x_0 \alpha + v \phi_S(\alpha, \beta) - v \phi_R(\alpha, \beta)] \quad (23)
 \end{aligned}$$

과 같다. 여기서  $v=1$ 일 때 원하는 상관 신호가 나타나고 나머지 상관 신호들은 1차 상관 신호에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가지므로 공간 필터를 사용하여 제거할 수 있다. 따라서 비선형 JTC의 출력을 1차 상관 신호에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 g_{1k}(U) = & \frac{2 \Gamma_m(k+1) [ |S(\alpha, \beta)| |R(\alpha, \beta)| ]^k}{\Gamma_m(1 - \frac{1-k}{2}) \Gamma_m(1 + \frac{1+k}{2})} \\
 & \times \cos[2 x_0 \alpha + \phi_S(\alpha, \beta) - \phi_R(\alpha, \beta)] \quad (24)
 \end{aligned}$$

식 (24)에서  $k=1/2$ 일 경우 출력되는 1차 상관 신호는

$$g_{11/2}(U) = (\pi/2) |R(\alpha, \beta)| \cos(2 x_0 \alpha) \quad (25)$$

와 같이 되어 시스템은 위상 정합 필터(phase-only matched filter)와 유사한 특성을 가진다.  $k=0$ 일 경우 비선형 JTC는

$$g_{10}(U) = \frac{4}{\pi} \cos[2x_0\alpha + \phi_S(\alpha, \beta) - \phi_R(\alpha, \beta)] \quad (26)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cos[2x_0\alpha]$$

과 같은 출력을 가지는데 이를 푸리에 역변환하면 상관 출력은 임펄스적인 응답을 가진다. 이러한 비선형 JTC는 입력영상과 기준영상의 위상만을 이용하므로 빛의 효율성이 좋고, 임펄스적인 상관 출력을 가지므로 자기 상관폭 등에서 전통적인 JTC보다 우수한 성능을 가진다. 광굴절 매질을 이용하면 제곱 법칙 검출기의 출력을 문턱치하기 위한 디지털적인 처리를 하지 않고도 비선형 JTC의 구현이 가능하다.

3. 광굴절 결합 변환 상관기

2광과 혼합을 이용하여 JTC를 구현하기 위해서는 기존의 2광과 혼합과는 반대로 신호빔의 세기를 펌프빔의 세기보다 크게 하여 입사시킨다. 즉 <그림 3>과 같이 광굴절 매질에 입사되는 두 빔 중 빔세기가 큰 신호빔에 입력평면 P<sub>1</sub>을 두고 기준영상 r(x+x<sub>0</sub>, y)과 입력영상 s(x+x<sub>0</sub>, y)을 분리해서 위치시키고, 입력평면의 영상들을 렌즈 L<sub>1</sub>에 의해 푸리에 변환하여 광굴절 매질에 입사한다.

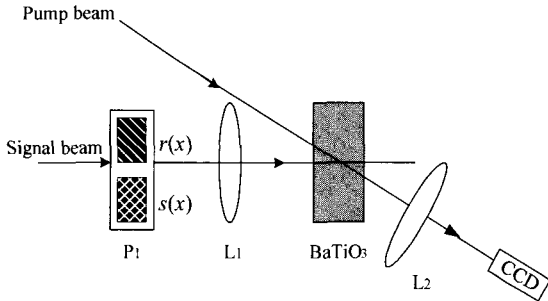


그림 3. 광굴절 JTC의 기본 구성도  
Fig. 3. Schematic configuration of photorefractive JTC.

이때 광굴절 매질에 입사되는 신호빔(A<sub>1</sub>) 대 펌프빔(A<sub>2</sub>)의 세기비는 결합 입력영상의 스펙트럼을 고려하면

$$m' = \left| \frac{A_1(0)}{A_2(0)} \right|^2 |F(\alpha, \beta)|^2 = m |F(\alpha, \beta)|^2 \quad (27)$$

과 같이 되고, 2광과 혼합되어 출력되는 빔은 식 (7)에 의해 다음과 같다.

$$A_2(\alpha, \beta) = A_2(0) \left[ \frac{1+m |F(\alpha, \beta)|^2}{1+m |F(\alpha, \beta)|^2 \exp(-\Gamma L_{eff})} \right]^{1/2} \quad (28)$$

<그림 4>는  $\sqrt{m}|F|$ 값에 대한 광굴절 매질의 전달함수를 보여준다.

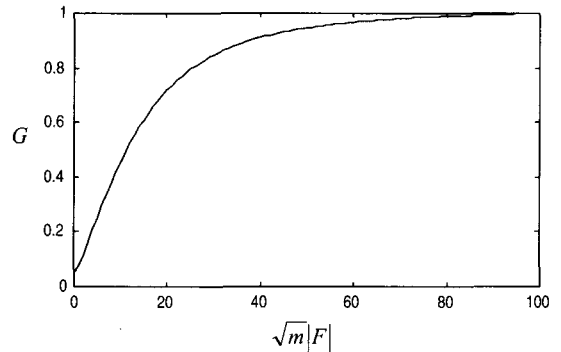


그림 4. 광굴절 JTC의 전달 함수  
Fig. 4. Transfer function of photorefractive JTC.

여기서 전달함수를 나타내는 G는

$$G = \left[ \frac{1+m |F(\alpha, \beta)|^2}{1+m |F(\alpha, \beta)|^2 \exp(-\Gamma L_{eff})} \right]^{1/2} \quad (29)$$

와 같고, |F|는 JTC의 입력평면의 스펙트럼을 나타낸다. <그림 4>에서 m을 매우 크게 하여 에너지 전달이 포화되게 만들면 전달 이득이 일정하게 되는데, 이때 광굴절 JTC의 출력은 식 (23)을 사용하면

$$A_2(\alpha, \beta) = A_2(0) \exp(\Gamma L_{eff}/2) g_{10}(U)$$

$$= A_2(0) \exp(\Gamma L_{eff}/2)$$

$$\times \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\epsilon_v \cos[2vx_0\alpha + v\phi_S(\alpha, \beta) - v\phi_R(\alpha, \beta)]}{\Gamma_m(1-v/2) \Gamma_m(1+v/2)} \quad (30)$$

과 같다. 여기서 g<sub>0</sub>(U)는 0차 비선형성을 나타낸다. 식 (30)에서 1차 자기 상관 신호를 살펴보면

$$A_2(\alpha, \beta) = A_2(0) \exp(\Gamma L_{eff}/2) g_{10}(U)$$

$$= A_2(0) \exp(\Gamma L_{eff}/2)$$

$$\times \frac{4}{\pi} \cos[2x_0\alpha + \phi_S(\alpha, \beta) - \phi_R(\alpha, \beta)] \quad (31)$$

과 같다. 식 (31)의 광굴절 JTC에서 출력되는 펌프빔(A<sub>2</sub>)을 푸리에 역변환하게 되면 임펄스적인 응답을 얻을 수 있다. 광굴절 JTC는 전통적인 JTC에 비해 CCD

로 기록하고 다시 SLM에 올리는 과정이 필요 없다는 장점을 가진다. 하지만 광굴절 JTC가 임펄스적인 상관 출력을 갖기 위해서는 2광파 혼합의 이득이 포화되어 스펙트럼의 크기가 큰 저주파 영역과 크기가 작은 고주파 영역의 이득이 같아지도록 신호 대 펌프빔의 세기비를 크게 해야하므로 실제 구현이 어렵다. 또한 고주파 영역의 이득이 증폭되므로 입력영상에 잡음이 있을 경우 상관 출력의 신호 대 잡음비가 낮아진다.

#### IV. 신호 대 잡음비가 개선된 제안한 광굴절 결합 변환 상관기

기존의 광굴절 JTC는 원하는 상관 출력을 얻기 위해 입력되는 두 빔의 세기비를 매우 크게 해야 하므로 실제 구현이 힘들고 역역과 상관기처럼 동작하므로 잡음이 섞인 입력영상의 경우에는 신호 대 잡음비가 낮아서 인식이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 두 빔의 세기비를 작게 조절하고 매질내에서의 두 빔의 유효 상호작용 길이를 조절하여 광굴절 JTC 상관 출력의 신호 대 잡음비를 개선하였다. 먼저 동일한 평면에 있는 입력영상과 기준영상을 통과한 신호빔을 푸리에 변환한 후 광굴절 매질(BaTiO<sub>3</sub>)에 입사하고, 이때 세기가 작은 펌프빔을 브래그 각도 정합 조건을 만족하도록 매질에 입사한다. 입사된 신호빔의 스펙트럼은 2광파 혼합에 의해 펌프빔으로 전달되므로 매질을 통과한 펌프빔을 푸리에 역변환하면 출력평면에 입력영상과 기준영상의 상관 결과가 나타난다. 이때 입력되는 신호 대 펌프빔의 세기비를 작게 하여 에너지 전달이 포화되지 않도록 하고, 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각도를 크게 하여 매질내에서의 두 빔의 유효 상호작용 길이가 짧아지도록 하였다. 그 결과 고주파 영역의 이득은 기존의 광굴절 JTC보다 상대적으로 줄어드는 반면 저주파 영역은 동일한 이득을 가지게 되어 입력영상에 잡음이 있는 경우 신호 대 잡음비가 개선되었다. <그림 5>는 제안한 광굴절 JTC의 입력평면의 스펙트럼에 대한 정규화된 전달 함수를 보여준다.

스펙트럼의 크기가 작은 고주파 영역의 이득은 작은 반면 스펙트럼의 크기가 큰 저주파 영역의 이득은 포화이득을 가진다. 따라서 일반적으로 고주파 영역의 스펙트럼을 가지는 잡음의 영향이 줄어든다. 그리고 결합계수와 유효 상호작용 길이의 곱인  $\Gamma L_{eff}$ 의 값을 달리 할 경우 광굴절 JTC의 2광파 혼합 전달함수는 같은 형

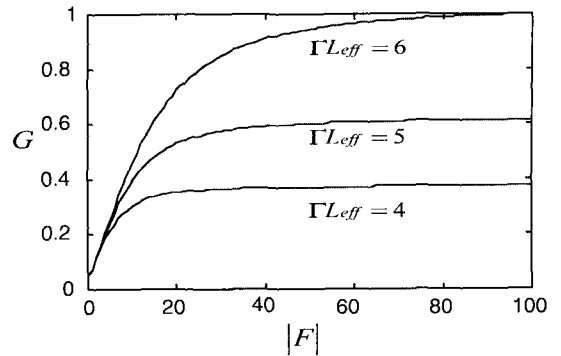


그림 5. 제안한 광굴절 JTC의  $\Gamma L_{eff}$ 값에 따른 전달 함수

Fig. 5. Transfer function of proposed photorefractive JTC for some  $\Gamma L_{eff}$ .

태를 가지지만 결합계수와 유효 상호작용 길이에 따라 고주파 영역에서의 기울기와 저주파 영역의 포화이득에서 차이가 나타나는데 이에 의해 상관 출력결과의 신호 대 잡음비가 달라진다. 결합계수는 매질의 특성에 의해 결정되나 유효 상호작용길이의 경우 매질에 입사되는 신호빔의 각도에 의해 조절이 가능하다. 즉 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각을 크게 하면 유효 상호작용 길이는 짧아지고, 각을 작게 하면 유효 상호작용 길이는 길어진다. 따라서 매질에 입사되는 빔의 세기비를 작게 하고 신호빔의 입사각을 조절하여 고주파 영역의 기울기와 저주파 영역의 이득을 작게 하면 상대적으로 스펙트럼의 크기가 작은 고주파 영역의 이득은 줄어들고, 스펙트럼의 크기가 큰 저주파 영역의 이득은 기존의 광굴절 JTC와 동일하게 포화이득을 가진다. 이러한 전달특성은 입력영상에 잡음이 있을 때 잡음 스펙트럼의 전달이득을 작게 하여 신호 대 잡음비를 개선할 수 있다.

입력잡음이 매우 크면 출력에서 상관 침투치와 다른 위치에 큰 출력잡음이 생기므로 오인식(false alarm)이 일어나지만 기존의 신호 대 잡음비는 잡음이 없을 때와 마찬가지로 여전히 높게 나타난다<sup>[9]</sup>. 따라서 잡음이 있는 입력영상의 경우 기존의 신호 대 잡음비로 시스템의 성능을 나타내기는 힘들다. 따라서 본 논문에서는 상관 신호의 침투치 대 root mean-square(rms)의 비를 신호 대 잡음비로 사용한다<sup>[10]</sup>.

출력의 침투치가 임의의  $x$ 에 위치한다고 가정했을 때 신호 대 잡음비는

$$SNR = \frac{|y(x)|^2}{y_{rms}} \quad (32)$$

와 같다. 여기서  $y_{rms}$ 는

$$y_{rms} = \left[ \frac{1}{N_{\Omega}} \sum_{i \in \Omega} |y(i)|^2 \right]^{1/2} \quad (33)$$

와 같고,  $\Omega$ 는 침두치의 50%이하값을 가지는 픽셀들의 모임을 나타낸다.

### V. 결과 및 고찰

#### 1. 컴퓨터 모의 실험

제안한 광굴절 JTC의 성능을 알아보기 위해 <그림 6>과 같은 단순한 이진 원 입력영상을 사용하여 컴퓨터 모의 실험을 하였다.

패턴인식의 응용에서는 배경잡음이 물체와 겹치지 않는 입력영상이 자주 나타나며, 전통적인 JTC의 경우 가우스 잡음이 있는 영상에 대해서는 우수한 성능을 보이나 이러한 겹치지 않는 배경잡음이 있는 영상에

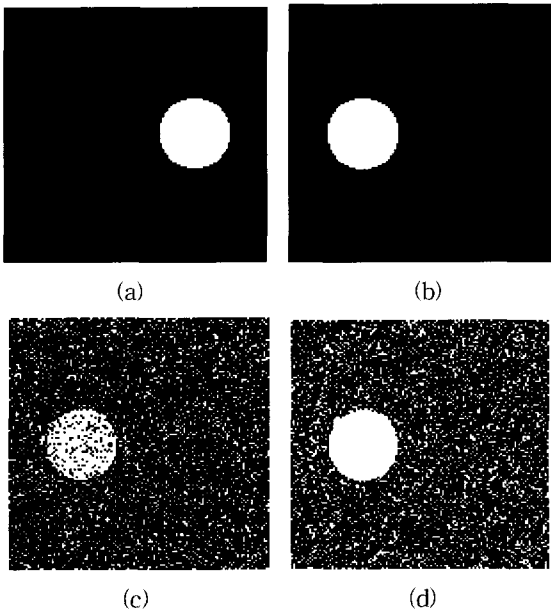


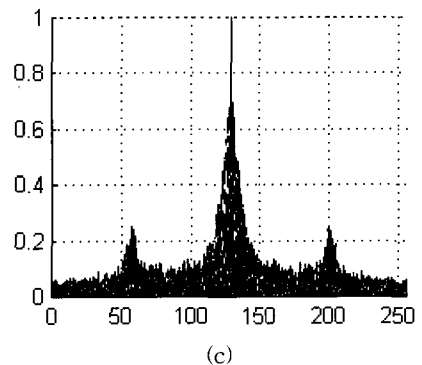
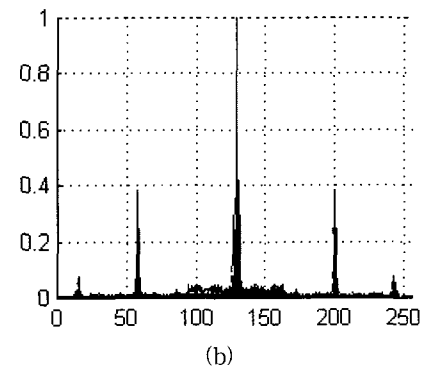
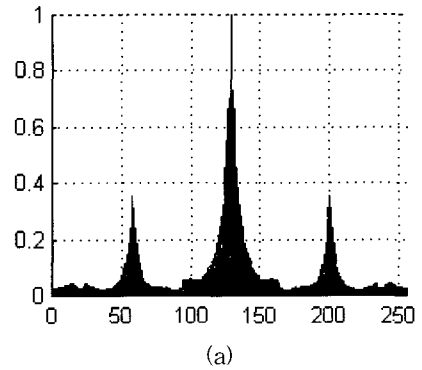
그림 6. 기준영상 및 입력영상 (a) 기준영상, (b) 잡음이 없는 입력영상, (c) 20%의 가우스 잡음이 있는 입력영상, (d) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상

Fig. 6. Reference image and signal images (a) reference image, (b) noise-free signal image, (c) signal image with 20% Gaussian noise, (d) signal image with 20% nonoverlapping background noise.

대해서는 상관 신호의 검출이 불가능하다. 따라서 입력영상을 <그림 6(b), (c), (d)>와 같이 잡음이 없을 때와 가우스 잡음이 있을 때, 겹치지 않는 배경잡음이 있을 때로 나누어 컴퓨터 모의 실험을 하였다.

<그림 7>은 각각의 입력영상에 대해 기존의 광굴절 JTC와 제안한 광굴절 JTC의 상관 출력을 정규화시켜 비교하였다.

출력평면의 중심에 자기 상관 성분이 나타나고, 이 성분을 중심으로 하여 대칭적으로 상호 상관 성분이 나타난다. <그림 7(a), (b)>는 기준영상과 잡음이 없는 입력영상을 결합하여 입력했을 때 상관 출력이다. 기존의 방법으로 광굴절 JTC를 동작시킬 때 부엽의 폭이 줄어들고, 상관 침두치에 대한 잡음의 비는 높아져 식





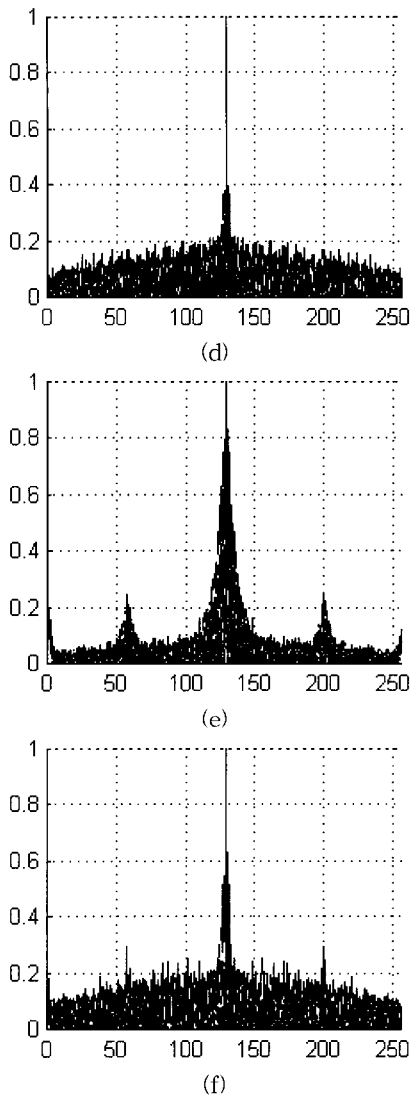


그림 7. 기존의 광굴절 JTC와 제안한 광굴절 JTC의 입력영상에 따른 상관 출력, 제안한 광굴절 JTC의 입력영상에 (a) 잡음이 없을 때, (c) 20%의 가우스 잡음이 있을 때, (e) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있을 때의 출력, 기존의 광굴절 JTC의 입력영상에 (b) 잡음이 없을 때, (d) 20%의 가우스 잡음이 있을 때, (f) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있을 때의 출력

Fig. 7. Correlation outputs of conventional and proposed photorefractive JTC for signal image (a) noise-free signal image, (c) signal image with 20% Gaussian noise, (e) signal image with 20% nonoverlapping background noise in proposed photorefractive JTC, (b) noise-free signal image, (d) signal image with 20% Gaussian noise, (f) signal image with 20% nonoverlapping background noise in original photorefractive JTC.

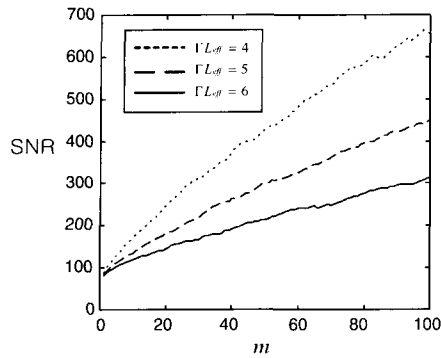
별능력이 우수함을 알 수 있다. <그림 7(c), (d)>는 20%의 가우스 잡음이 있는 입력영상, <그림 7(e), (f)>는 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상을 각각 기존영상과 결합하여 입력했을 때 상관 출력이다. 기존 광굴절 JTC의 경우 잡음에 상관 출력신호가 묻혀서 식별이 어려운데 비해 제안한 광굴절 JTC의 경우 식별이 가능함을 알 수 있다.

<그림 8>은 입력영상에 잡음이 없을 때, 가우스 잡음이 있을 때와 겹치지 않는 배경잡음이 있을 때 광굴절 JTC 상관 출력의 신호 대 잡음비를 결합계수와 유효 상호작용 길이의 곱을 달리하여 나타냈다.

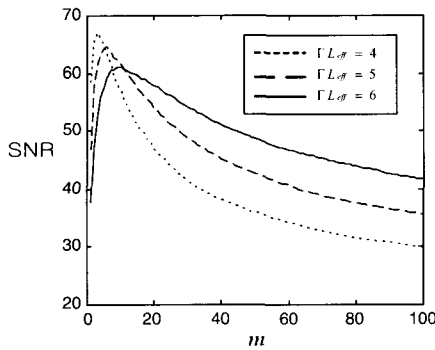
<그림 8(a)>는 입력영상에 잡음이 없을 경우 상관 출력의 신호 대 잡음비로 빔세기의 비가 클수록 높은 값을 가진다. 즉 기존의 광굴절 JTC가 우수한 상관 출력을 가진다. 하지만 <그림 8(b), (c)>와 같이 가우스 잡음이 있는 입력영상과 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상을 기존영상과 결합하여 입력했을 경우 빔세기 비가 매우 큰 기존의 광굴절 JTC보다 제안한 빔세기 비가 작은 광굴절 JTC의 신호 대 잡음비가 더 높게 나타난다. 그리고 결합계수와 유효 상호작용 길이의 곱에 의해 신호 대 잡음비의 최대값이 달라지는데, 이중 결합계수는 BaTiO<sub>3</sub>의 고유특성에 의해 정해지지만 유효 상호작용 길이는 입력되는 신호빔의 각도에 의해 조절할 수 있다. 따라서 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각을 크게 하여 유효 상호작용 길이를 작게 만들면 우수한 상관출력을 가지게 된다.

<표 1>은 기존의 광굴절 JTC와 제안한 광굴절 JTC의 입력영상에 대한 신호 대 잡음비를 수치적으로 보여준다.

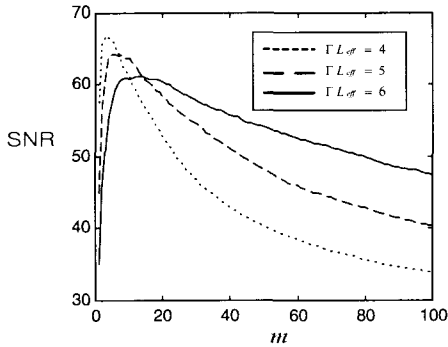
입력영상에 잡음이 없을 경우 기존의 광굴절 JTC가 더 우수한 신호 대 잡음비를 가지지만 잡음이 섞인 영상에 대해서는 빔세기의 비와 신호빔의 각도를 조절한 광굴절 JTC에서 최대 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 다소 복잡한 형태의 입력영상에서도 신호 대 잡음비의 개선이 가능한지 보기 위해 <그림 9>와 같은 비행기 영상을 입력으로 사용하여 두 광굴절 JTC에 대해 상관 출력의 신호 대 잡음비를 조사해 보았다. <표 2>의 결과처럼 단순한 이진 원 영상에 비해서는 빛의 투과가 줄어들어 상관 출력의 성능이 떨어지나 잡음이 있는 영상에 대해서 여전히 제안한 방법을 사용한 광굴절 JTC의 성능이 우수함을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 빔세기의 비에 따른 신호 대 잡음비 (a) 잡음이 없는 입력영상에 대한 SNR, (b) 20%의 가우스 잡음이 있는 입력영상에 대한 SNR, (c) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상에 대한 SNR

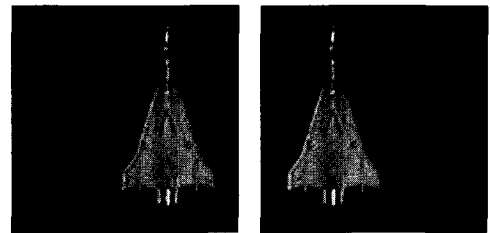
Fig. 8. Signal-to-noise ratios for beam ratio (a) SNR for noise-free signal image, (b) SNR for signal image with 20% Gaussian noise, (c) SNR for signal image with 20% nonoverlapping background noise.

제안한 광굴절 JTC의 신호 대 잡음비 개선이 어느 정도의 입력잡음까지 적용되는지 알아보기 위해 <그림

표 1. 기존의 광굴절 JTC와 제안한 광굴절 JTC의 신호 대 잡음비

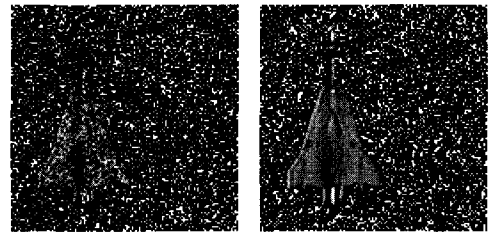
Table 1. Signal-to-noise ratio for conventional and proposed photorefractive JTC.

	conventional photorefractive JTC	proposed photorefractive JTC
noise-free signal image	3172.4	178.3
signal image with 20% Gaussian noise	18.0	61.1
signal image with 20% nonoverlapping background noise	31.3	63.4



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 9. 기준영상 및 입력영상 (a) 기준영상, (b) 잡음이 없는 입력영상, (c) 20%의 가우스 잡음이 있는 입력영상, (d) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상

Fig. 9. Reference image and signal images (a) reference image, (b) noise-free signal image, (c) signal image with 20% Gaussian noise, (d) signal image with 20% nonoverlapping background noise.

10>과 같이 입력영상의 잡음비를 달리 하여 출력되는 신호 대 잡음비를 살펴보았다. <그림 11>은 이러한 입력영상들에 대해 출력되는 신호 대 잡음비를 정규화시켜 나타내었다.

표 2. 기존의 광굴절 JTC와 제안한 광굴절 JTC의 신호 대 잡음비

Table 2. Signal-to-noise ratio for conventional and proposed photorefractive JTC.

	conventional photorefractive JTC	proposed photorefractive JTC
noise-free signal image	3125.2	125.5
signal image with 20% Gaussian noise	13.3	21.4
signal image with 20% nonoverlapping background noise	17.4	27.9

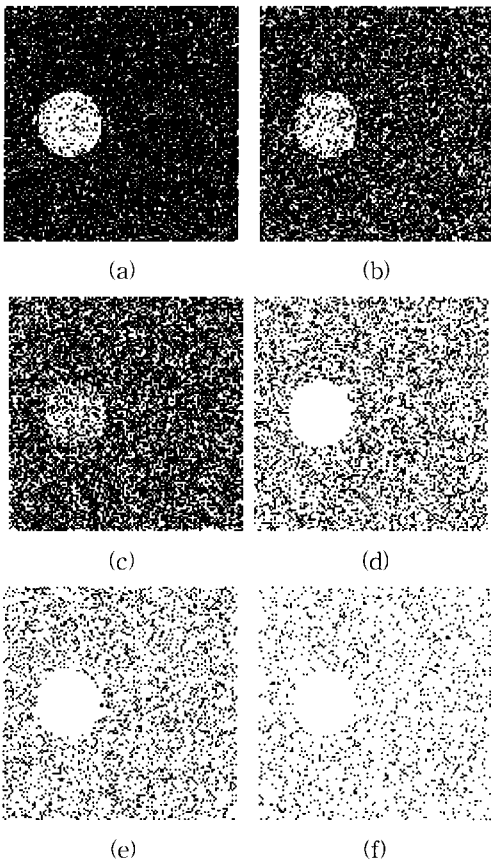


그림 10. 잡음비를 달리한 입력영상 (a) 20%, (b) 30%, (c) 40%의 가우스 잡음이 있는 입력영상, (d) 70%, (e) 80%, (f) 90%의 겹치지 않는 배경 잡음이 있는 입력영상

Fig. 10. Signal images for some input noise ratio, signal image with (a) 20%, (b) 30%, (c) 40% Gaussian noise, signal image with (d) 70%, (e) 80%, (f) 90% nonoverlapping background noise.

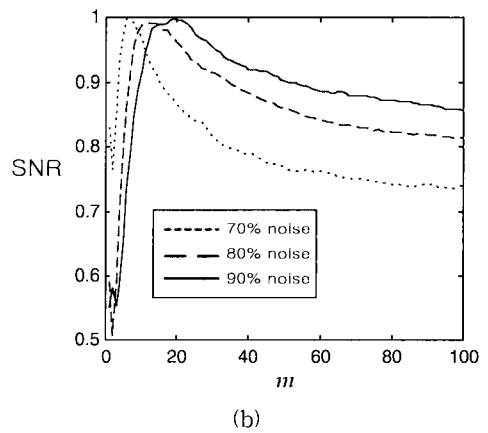
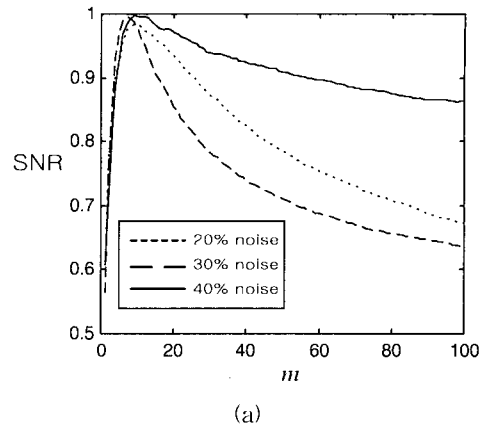


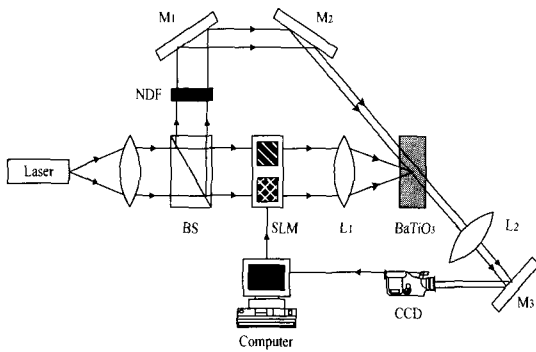
그림 11. 입력 잡음에 따른 신호 대 잡음비 (a) 입력 영상에 가우스 잡음을 20%, 30%, 40%로 했을 때 출력되는 신호 대 잡음비, (b) 입력 영상에 겹치지 않는 배경잡음을 70%, 80%, 90%로 했을 때 출력되는 신호 대 잡음비

Fig. 11. Output signal-to-noise ratios for input noise ratio (a) Output SNR when input Gaussian noise is 20%, 30%, 40%, (b) Output SNR when input nonoverlapping background noise is 70%, 80%, 90%.

입력영상에 더해주는 가우스 잡음이 많아질수록 신호 대 잡음비 그래프가 점점 평행하게 된다. 50% 이상의 잡음이 더해지면 기존 광굴절 JTC와 제안한 방법을 사용한 광굴절 JTC의 출력되는 신호 대 잡음비는 차이가 없어지고 출력 상관 신호의 검출은 불가능하다. 하지만 겹치지 않는 배경잡음의 경우 대부분의 잡음에 대해 상관 출력의 검출이 가능하다.

2. 광학적 실험 및 고찰

BaTiO<sub>3</sub>에서 2광파 혼합을 이용한 광굴절 JTC의 구성도는 <그림 12>와 같다.



BS : Beam splitter

M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> : Mirror

L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> : Fourier transform lens

NDF : Neutral density filter

그림 12. 2광파 혼합을 이용한 광굴절 JTC의 광학적 실험 구성도

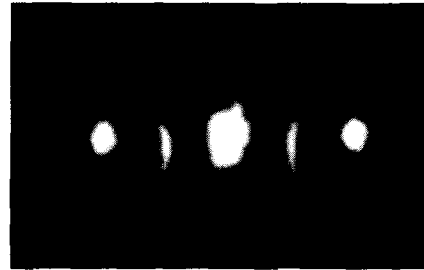
Fig. 12. The configuration of optical experiment for photorefractive JTC using two-beam coupling.

실험에 사용된 광원은 22mW의 출력을 가지고 파장이 632.8nm인 He-Ne 레이저이고, 광굴절 매질인 BaTiO<sub>3</sub>(4.8×5.8×6.0mm<sup>3</sup>)는 정상 굴절률(n<sub>o</sub>)이 2.437, 이상 굴절률(n<sub>e</sub>)이 2.365이며, c축이 5.8mm에 평행하고 육면이 연마(polishing)된 결정이다. 레이저에서 나온 빔은 빔 분할기(beam splitter, BS)에 의해서 두 개의 빔으로 나뉘어진다. 이 때 직진하는 빔을 신호빔으로, 반사되는 빔을 펌프빔으로 하였다. 신호빔의 세기를 1.8mW로 두고, 펌프빔의 세기를 NDF(neutral density filter)로 제어하며 실험하였다. 입력평면에 기준영상과 입력영상을 함께 두면, 렌즈 L1에 의해 BaTiO<sub>3</sub>에 입력 평면의 푸리에 변환된 결과가 나타난다. 이때 펌프빔을 BaTiO<sub>3</sub>에 입사시키면 2광파 혼합에 의해 빔세기가 큰 신호빔에서 빔세기가 작은 펌프빔으로 에너지의 전달이 일어난다. 출력되는 펌프빔을 렌즈 L2로 푸리에 역 변환하면 원하는 상관 출력이 나타난다. <그림 13>은 잡음이 섞인 이진 원 영상을 입력으로 사용했을 때 제안한 방법을 사용한 광굴절 JTC의 상관 출력 결과를 나타낸다.

입력영상에 가우스 잡음이나 겹치지 않는 배경잡음이 있을 경우 검출 가능한 신호 대 잡음비를 가지며 BaTiO<sub>3</sub>의 2광파 혼합 특성에 의해 영상의 예지가 강조되어 나타난다.



(a)



(b)

그림 13. 광 실험에 의해 얻어진 상관 출력 결과 (a) 20%의 가우스 잡음이 있는 입력영상에 대한 상관 출력 결과, (b) 20%의 겹치지 않는 배경잡음이 있는 입력영상에 대한 상관 출력 결과

Fig. 13. Correlation output results by optical experiment (a) Correlation output result for signal image with 20% Gaussian noise, (b) Correlation output result for signal image with 20% nonoverlapping background noise.

## VI. 결 론

본 논문에서는 BaTiO<sub>3</sub>의 2광파 혼합 특성을 이용하여 광굴절 결합 변환 상관기의 신호 대 잡음비를 개선하였다. 입력되는 신호 대 펌프빔의 세기비를 작게 하여 에너지 전달이 포화되지 않도록 하고, 신호빔과 매질의 표면이 이루는 각도를 크게 하여 매질내에서의 두 빔의 유효 상호작용 길이가 짧아지도록 하였다. 그 결과 고주파 영역의 이득은 기존의 광굴절 결합 변환 상관기보다 상대적으로 줄어드는 반면 저주파 영역은 동일한 이득을 가지게 되어 입력영상에 잡음이 있는 경우 신호 대 잡음비가 개선되었다. 또한, 기존의 광굴절 결합 변환 상관기에서는 원하는 상관 출력을 얻기 위해 신호 대 펌프빔의 세기비를 매우 크게 하여 2광파 혼합에 의한 에너지 전달이 포화가 되도록 해줘야 되었으나 본 논문에서 제안한 광굴절 결합 변환 상관기의 경우 두 빔의 세기비를 작게 하여 에너지 전달이

포화되지 않도록 하였으므로 실제 구현이 용이해졌다.

컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 통하여 제안한 방법이 잡음이 있는 입력영상에 대한 광굴절 결합 변환 상관기의 신호 대 잡음비를 개선하는데 사용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] J. Feinberg, D. Heiman, A. R. Tanguay, Jr., and R. W. Hellwarth, "Photorefractive effects and light-induced charge migration in barium titanate," *J. Appl. Phys.*, Vol. 51, pp. 1297~1305, 1980.

[2] 김성완, 김철수, 김종찬, 김종윤, 이승희, 김수중, "변이불변 특성이 개선된 광굴절 상관기를 이용한 실시간 광 패턴인식 시스템의 구현," *대한전자공학회 논문지*, 제 35D권 제 3호, pp. 63~69, 1998.

[3] T. Tschudi, A. Herden, J. Goltz, H. Klumb, F. Laeri, and J. Albers, "Image amplification by two- and four-wave mixing in BaTiO<sub>3</sub> photorefractive crystals," *IEEE J. of Quan. Elec.*, Vol. QE-22, No. 8, pp. 1493~1502, Aug. 1986.

[4] R. Tripathi, G. S. Pati, K. Singh,

"Photorefractive joint transform correlator using incoherent erasure in two- and four-wave mixing geometries in a BaTiO<sub>3</sub> crystal," *Opt. Eng.*, Vol. 37, pp. 2148~2155, 1998.

[5] J. Khoury, MCronin-Golomb, P. D. Gianino, and C. L. Woods, "Photorefractive two-beam-coupling nonlinear joint-transform correlator," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 11, pp. 2167~2174, 1994.

[6] C. S. Weaver and J. W. Goodman, "Technique for optically convolving two functions," *Appl. Opt.*, Vol. 5, pp. 1248~1249, 1966.

[7] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, 1968.

[8] B. Javidi, "Nonlinear joint power spectrum based optical correlation," *Appl. Opt.*, Vol. 28, pp. 3106~3111, 1989.

[9] B. Javidi and J. Wang, "Limitation of the classic definition of the correlation signal-to-noise ratio in optical pattern recognition with disjoint signal and scene noise," *Appl. Opt.*, Vol. 31, pp. 6826~6829, 1992.

[10] B. V. K. V. Kumar and L. Hassebrook, "Performance measurement of correlation filters," *Appl. Opt.*, Vol. 29, pp. 2997~3006, 1990.

저 자 소 개



孔明述(正會員)  
1973년 10월 26일생. 1999년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 2003년 2월~현재 (주) 아프로텍 근무중.  
<주관심분야 : 광 패턴 인식, 광굴절 매질, 홀로그래프 및 광 메모리>

徐東煥(正會員) 第38卷 SD編 第11號 參照  
현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중

申昌睦(正會員) 第40卷 SD編 第1號 參照  
현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중



황圭甫(正會員)

1973년 3월 22일생. 1999년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2001년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2001년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. <주관심분야

: 광 패턴인식, 광 보안, 편광, 홀로그램 및 광 메모리>

金喆洙(正會員) 第33卷 B編 第11號 參照

현재 : 경주대학교 컴퓨터 전자공학부 부교수

金秀重(正會員) 第33卷 B編 第7號 參照

현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 정교수