

## BaTiO<sub>3</sub> 단결정을 이용한 광패턴인식

正會員 權元鉉\*, 準會員 李權淵\*,

正會員 吳昌錫\*\*, 正會員 朴漢奎\*

### Optical Pattern Recognition System using a BaTiO<sub>3</sub> Single Crystal

Won Hyun KWON\*, Kwon Yeon LEE\*, Chang Suk OH\*\* Han Kyu PARK\* *Regular Members*

**要 約** 광굴절 효과를 갖는 BaTiO<sub>3</sub> 단결정에서의 실시간 홀로그램을 이용한 광패턴인식 시스템을 해석하고 실험하였다.

시스템의 패턴 판별능력을 높이기 위해 edge enhancement 기법을 도입하였으며, 주파수 평면 상관기 구조로 구성된 시스템은 5.5mW의 저출력 광원으로 8sec 이내에 패턴인식이 가능하였다.

**ABSTRACT** Optical pattern recognition system using real-time hologram mechanism in a photorefractive BaTiO<sub>3</sub> single crystal is analyzed and experimented.

Edge enhancement technique is introduced for enhancing pattern discrimination capability, and patterns can be recognized within 8 sec with 5.5mW low incident light intensity.

#### I. 서 론

1964년 Vander Lugt가 광의 광대역, 병렬처리 능력을 신호처리분야에 이용하고자 하는 제안<sup>1)</sup>을한 이래 계속되어 온 광 패턴인식은 정합필터의 기록 매질로서 홀로그램 건판을 이용하는 방식이 주류를 이루고 있다. 그러나 기존의 홀로

그램 방식은 기록 및 재생을 위해 현상, 정착 등의 과정이 필요하므로 실시간 동작이 불가능하다는 단점을 지닌다. 이러한 문제점들은 기록매질로서 광굴절 효과를 갖는 비선형광학 물질을 채택함으로써 해결할 수 있다.

비선형 매질에서의 위상공액 현상을 이용한 광 신호처리에 관한 연구는 1966년 Ashkin 등이 LiNbO<sub>3</sub> 결정에서의 광굴절효과를 발견하고<sup>2)</sup>, 1971년 B.I. Stepanov가 CS<sub>2</sub> 투명 매질 내에서의 축퇴4광파혼합(degenerate four wave mixing; DFWM) 현상을 이용한 위상공액파를 발생시킨

\*延世大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

\*\*忠北大學校 電子計算機 工學科  
(Dept. of Computer Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

論文番號 : 89-38(接受 1989. 6. 8)

이후 본격화되었으며<sup>(3)</sup>, 각종 영상신호처리, 광논리소자, 광영상증폭기등<sup>(4)</sup> 그 응용범위가 날로 증가되고 있다.

본 논문에서는 A.Yariv가 DFWM과 실시간 홀로그래피가 동일현상임을 밝힌 이론을 근거로 하여<sup>(5)</sup>, BaTiO<sub>3</sub>를 이용한 주파수 평면 상관기 구조를 갖는 패턴인식 시스템을 구현하고 edge enhancement 기법을 이용해 효과적인 패턴인식을 수행하였다.

## II. 실시간홀로그래피 이론

비선형 매질에 광이 입사되면 매질 내에서 전하의 분리로 인해 전계가 발생된다. 이러한 전계는 전기광학효과(Pockel's effect)에 의해 굴절률 변화 유발시키는데 이러한 현상을 광굴절 효과 (Photorefractive effect)라 한다<sup>(6)</sup>. 이 굴절률 변화를 홀로그램 영상을 기록하는 부피격자로 작용하며 이러한 특성의 매질로는 Bi<sub>12</sub>(Si,Ge)O<sub>20</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, SBN 등이 있으며, 이중 BaTiO<sub>3</sub>결정의 경우 반응시간은 낮으나 매우 큰 전기광학계수( $r_{42}=820 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ) 및 강한 결합강도를 갖고있어 외부전극이 필요없고 저출력의 He-Ne레이저로도 실현가능하다는 장점을 지닌다.

일반적으로 광굴절 매질 내에서의 전하의 이동 현상은 Hopping 모델과 Band transport 모델 (혹은 비울방정식)로 설명되나 band transport 모델이 더 보편적으로 통용된다<sup>(4)</sup>. 이 Band transport 모델은 결정 내에 도우너와 억셉터 trap(일종의 불순물 준위: 도우핑된 LiNbO<sub>3</sub>의 경우 Fe<sup>2+</sup>)이 존재한다고 가정할때, 실시간 홀로그램 격자가 형성되는 과정은 다음과 같이 요약된다.

(1) 결정 내에 광이 입사되면 광여기된 전자 (또는 정공)는 도우너 (또는 억셉터) 트랩으로부터 전도대로 천이하게 되며, 이온화된 도우너는 비어있는 trap site로 작용하게된다.

(2) 전도대로 천이된 전자는 광 간섭무늬의

어두운 부분으로 확산된 후 빈 trap에 다시 갇히게 되어 이온화된 공간전하장을 형성하게 된다.

(3) 이 공간전하장 분포는 광세기에 대해 위상차를 갖는 공간전하전계를 발생시킨다.

(4) 공간전하 전계는 Pockel's effect에 의해 공간 전하전계에 비례하는 굴절률 변화를 야기시킨다. 이러한 굴절률 변화는 매질 내에 고질의 홀로그래피 영상을 기록할 수 있는 부피격자로 작용하며, 이 격자에 재생빔을 조사하면 원래의 영상이 재생된다.

이와같은 광굴절 매질을 기록매질로 사용하는 실시간 홀로그램의 기본구조를 그림 1에 나타내었다.

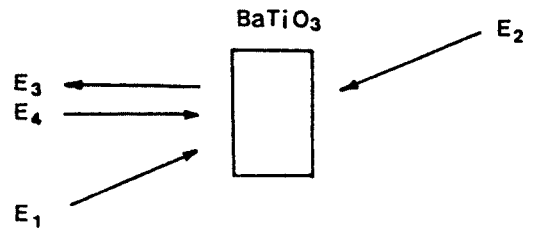


그림 1. 실시간 홀로그램의 구성도  
Real-time hologram geometry

그림에서 E<sub>1</sub>은 펌프빔, E<sub>2</sub>는 재생빔, E<sub>3</sub>는 출력빔, E<sub>4</sub>는 신호빔을 나타내며,

$$E_j = A_j(r) \exp(i(\omega t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})) + c. c,$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = 0 \tag{1}$$

이다.

E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>4</sub> 세 빔의 결합에 의해 발생하는 출력빔 E<sub>3</sub>는 결합파동방정식(coupled-wave equation)으로 나타낼 수 있으며, 위상정합조건과 slowly varying amplitude approximation<sup>(4)</sup>을 적용하면

$$\frac{dA_1}{dz} = -\frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_1^* + A_2^* A_3) A_4 - \alpha A_1 \quad (2)$$

$$\frac{dA_2^*}{dz} = -\frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_1^* + A_2^* A_3) A_3^* + \alpha A_2^* \quad (3)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_1^* + A_2^* A_3) A_2 + \alpha A_3 \quad (4)$$

$$\frac{dA_4^*}{dz} = \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_1^* + A_2^* A_3) A_4^* - \alpha A_4^* \quad (5)$$

여기서는 \*는 복소정합,  $\gamma$ 는 광굴절 매질의 결합상수,  $I_0$ 는 전체입사빔의 세기,  $\alpha$ 는 결정의 흡수계수이다. 비감쇄 펌프(undepleted pump:  $A_1, A_2 \gg A_3, A_4$ ) 및  $\alpha=0$ 를 가정하면 식(4)의  $A_2^* A_3 A_2$  및  $\alpha A_3$ 는 무시할 수 있으므로

$$\frac{dA_3}{dz} \cong \frac{\gamma}{I_0} A_1 A_2 A_2^* \quad (6)$$

만약 광로차 혹은 편광상태를 조정해 재생빔  $E_2$ 를  $E_1, E_4$ 와 인코히런트하게 하고,  $E_1$  및  $E_2$ 를 평행광이라 가정하면 회절격자에 의해 회절된 출력  $A_3$ 는

$$A_3 \propto A_1 A_2 A_4^* \quad (7)$$

가 되어 실시간 홀로그램과 동일한 작용을 수행하게 된다.

### Ⅲ. 실시간홀로그램을 이용한 광패턴인식

앞에서 서술한 실시간 홀로그램 현상은 광상관기(correlator), 광논리처리 등 실시간 광영상처리 분야에 광범위하게 적용가능하다. 이중 광상관기는 일반적으로 주파수 평면상관기(frequency-plane correlator) 및 결합변환 상관기(joint-transform correlator)로 분류할 수 있는데<sup>1)</sup>, 본 논문에서는 시스템 구성이 간편한 주파수 평면 광상관기만을 고려한다.

입력분포  $U_1(x,y)$ 와 델타함수로 표현되는 펌프빔  $U_4(x,y)$ 는 푸리에 변환렌즈  $L_1$ 에 의해 푸리에 변환된 후 결정 내에 입사되어 두 패턴의 간섭무늬 형태의 위상 격자를 기록시키며, 이때 실시간 홀로그램의 복소 변조지수  $m_{14}$ 는<sup>1)</sup>

$$m_{14} = \frac{2 U_4^*(x', y') U_1(x', y')}{(|U_4(x', y')|^2 + |U_1(x', y')|^2)} \\ = \frac{2 U_4^*(x', y') U_1}{|U_4(x', y')|^2 + I_1} \quad (8)$$

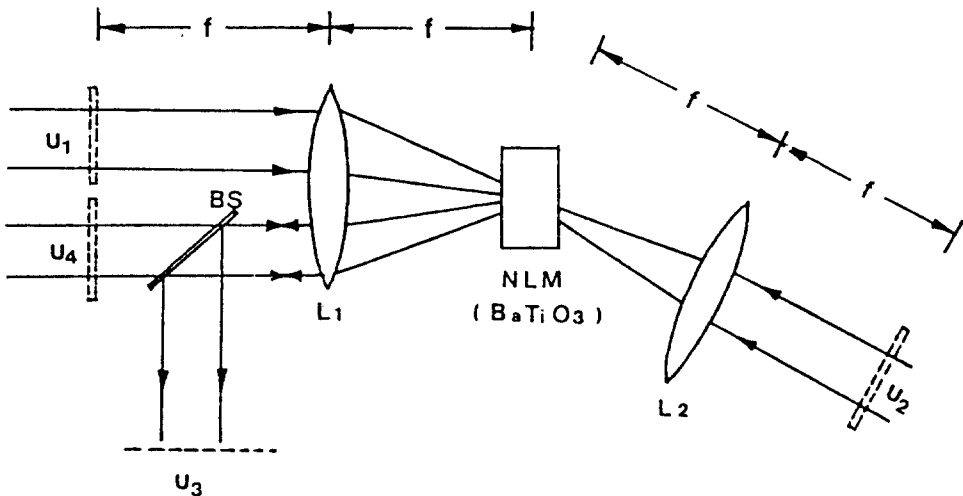


그림 2. 주파수 평면 광상관기  
Frequency plane correlator

이며,  $U_1(x',y')$ 은  $U_1(x,y)$ 의 푸리에 변환이다. 따라서 재생빔  $U_2(x',y')$ 에 의해 회절된 출력  $U_3(x',y')$ 은

$$U_3(x',y') = Am_1 U_2(x',y') \\ = \frac{2 U_1 U_1^*(x',y') U_2(x',y')}{|U_1(x',y')|^2 + I_1} \quad (9)$$

로 되어  $U_2, U_1$  입력에 대한 코릴레이션 결과를 얻을 수 있다. 그런데 일반적인 DFWM 구조에서는  $|U_1(x',y')|^2 \gg I_1$ 이므로 식(5)에서

$$U_3(x',y') = \frac{2 U_1(x',y') U_1^*(x',y') U_2(x',y')}{I_1} \quad (10)$$

으로 되어 형태와 크기가 비슷한 입력에 대한 코릴레이션 peak가 비슷해져 판별이 어렵게 된다. 이와같은 문제점을 해결하기 위해 grating modification 방식<sup>(6)</sup>, thresholding 방식<sup>(7)</sup> 등이 제안되었지만 본 논문에서는 각 패턴들 간의 cross-correlation 을 최대한 제거하기 위하여 edge enhancement 방식<sup>(8)</sup>을 도입하였다.

이 방식은 입사빔의 세기를 조절  $|U_1(x',y')|^2 \gg I_1$  하여 일반적인 실시간 홀로그래프의 변조지수를 변경시킴으로써 비교적 간단히 실현시킬 수 있다. 일반적으로 광굴절 매질에서의 edge enhancement는 신호빔대 펌프빔의 비를 4:1이하도록 반전시킬때 발생되며, 너무 큰 신호빔의 반전은 두 빔 간의 coupling 크기를 줄여 회절효율을 저하시킨다.<sup>(8)</sup>

이 방식의 신호 판별 능력을 알아보기 위하여 그림 3-(a)와 같은 비슷한 패턴을 이용해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3-(a)는 인식될 두 패턴이며, 그림 3-(b)는 일반적인 실시간 홀로그래프 ( $|U_1|^2 \gg I_1$ )에 대한 Computer simulation 결과이며, 그림 3-(c)는  $U_1^2 : I_1 = 4:1$ 로 한 결과이다. cyber 170 컴퓨터와 FFT3D알고리즘을 사용하였으며, 일반적인 실시간 홀로그래프를 사용하는 경우에는 두 패턴에 대한 cross correlation 이 autocorrelation

과 비슷하게 되어 판별이 어렵게 되지만, edge enhancement 인 경우 cross correlation이 줄어들어 실시간 홀로그래프 구조보다 패턴 판별능력이 뛰어난을 알 수 있다.

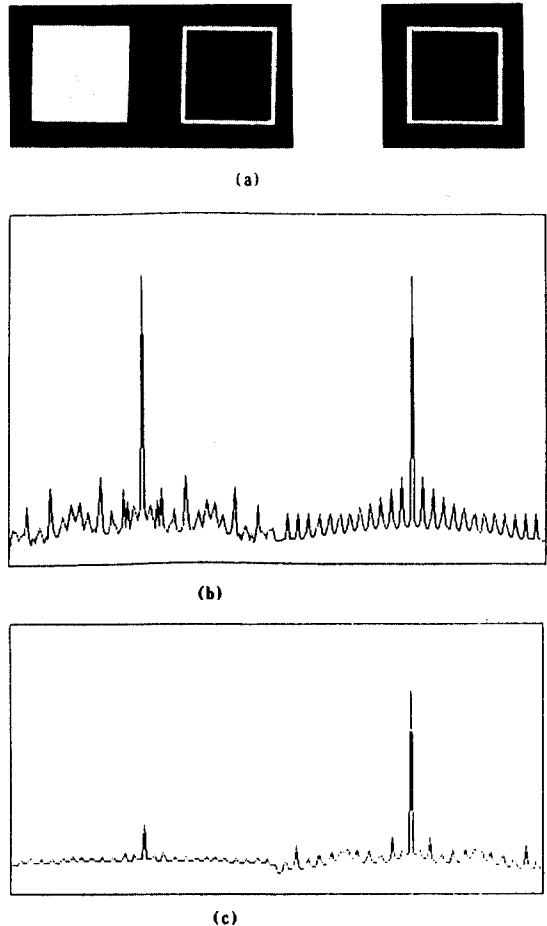


그림 3. Edge Enhancement 방식  
Edge enhancement method  
(a) 입력 패턴  
(a) input pattern  
(b) 코릴레이션 결과(일반적인 경우)  
(b) correlation result(general case)  
(c) 코릴레이션 결과(Edge enhancement)  
(c) edge enhancement

#### IV. 실험 및 결과고찰

구성된 광 패턴인식 시스템의 구성도는 그림 4와 같다. 실험에서 사용된 BaTiO<sub>3</sub> 결정은 7.5

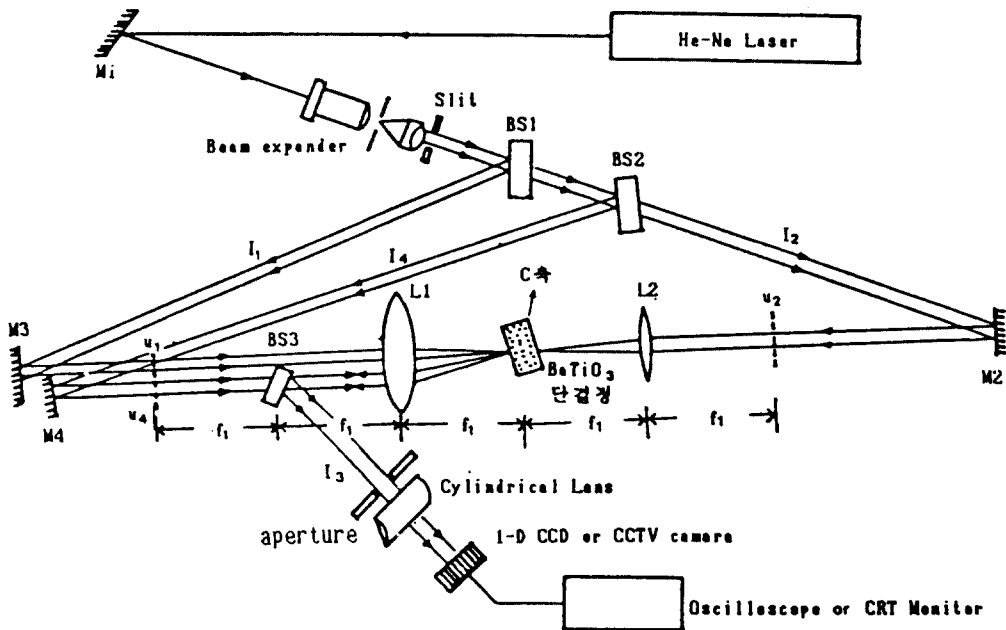


그림 4. 패턴인식 시스템 구성도

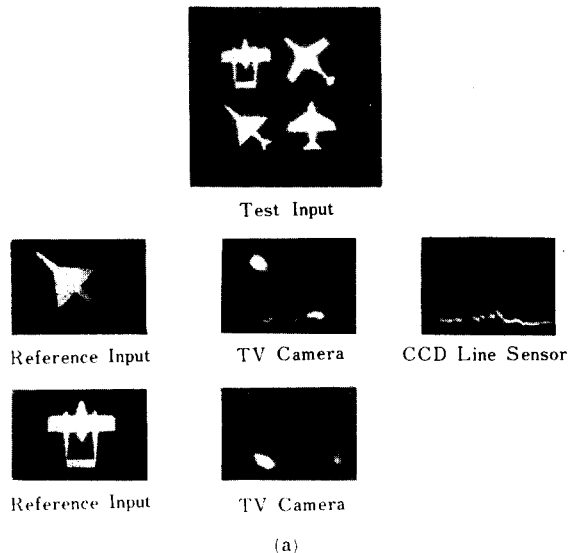
6×5.12×5.48mm로서 C 축은 7.56mm면 상으로  
서 있다.

광원으로 출력 5.5mW의 He-Ne 레이저를  
사용하였고, 광속을 평행광으로 만든 후 빔 분할  
기 BS1과 BS2를 이용해  $I_2:I_1:I_4=92.3\mu W: 0.512mW: 1.37mW$ 로 만들어 일반적인 실시간  
홀로그래프 구조와는 반대로 반전시켰다. 그리고  
빔  $I_2$ 는 경로차를 두어 기록빔과는 인코히런트하  
게 하였고, 사용된 렌즈는  $f=400mm$ 이다. 두  
입력빔사이의 각도는  $2\theta$ 는 상호작용 길이를  
길게하기 위하여  $7^\circ$  정도로 하였으며,  $I_1$ 의 경로  
에 ND(Neutral Density) 필터를 두어 신호빔  
 $I_4$ 와의 빔 세기비를 조절하였다.

$U_1$ 으로는 pinhole(델타함수)을,  $U_2$ 와  $U_4$ 에는  
Test input 및 Reference input을 각각 위치시킨  
후 패턴인식 실험을 수행하였다.

사진1 (a)는 4개 비행기 패턴에 대한 인식  
결과를 CCTV 카메라 및 Fair Child 사의 CCD  
라인센서로 검지한 것이며, (b)는 탱크와 군인에  
대한 코릴레이션 결과이다. 사진 2 (a)는 “  
DATA” 패턴으로부터 “A”자를 인식한 결과이  
다.

본 실험의 조건 하에서 각 패턴들을 위치시킨  
후 약 8초 이내에 코릴레이션 결과가 출력되었으  
며, 원래 물체의 위치에서 정확한 autocorrelation  
결과를 얻을 수 있었고, 영상 Threshold를  
출력단에 위치시켜 cross correlation을 억제하면  
더욱 우수한 특성의 인식시스템구현이 가능하게  
될 것이다.



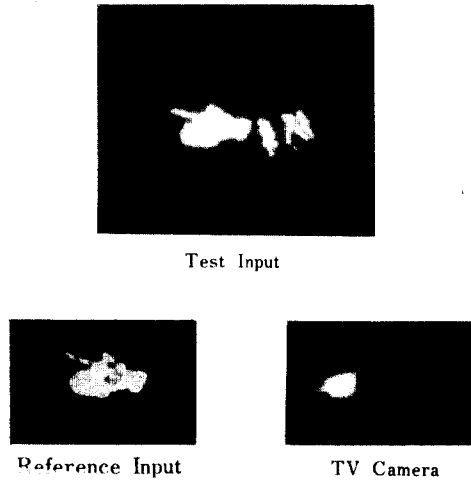


사진 1 실험 결과  
Experimental Results

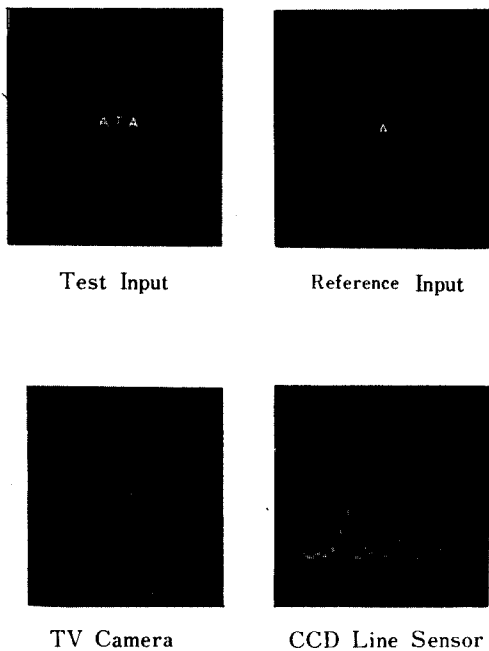


사진 2 실험 결과  
Experimental Results

## V. 결 론

본 논문에서는 BaTiO<sub>3</sub> 광굴절 매질에서의 실시간 홀로그램 특성을 이용하여 광 패턴 인식 시스템을 구성하고 실험하였다.

시스템의 패턴 인식능력을 향상시키기 위해 edge enhancement 기법을 적용하였으며, 실제 구성된 시스템은 5.5mW의 저출력 레이저로도 구성할 수 있어 향후 광 영상처리 및 광 신호처리 분야에 다양하게 응용될 수 있을 것이다.

또한 실제 적용을 위해서는 반도체 광원 등을 이용한 소형의 광원과 SLM, LCTV 등과 같은 실시간 입력소자의 도입, 크기, 회전 등 좌표계 불변 시스템에 대한 연구도 필요하다 하겠다.

---

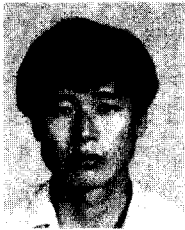
※ 본 연구는 학술진흥재단의 자유공모과제 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

---

## REFERENCES

1. L.A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering", IEE Trans. on Inf. Theory, IT-10, pp 139~145, 1964.
2. Ashkin, "Optically induced refractive index inhomogeneties in LiNbO<sub>3</sub> and LaTiO<sub>3</sub>", Appl. Opt., vol.9, no.1, pp 72~76, 1966.
3. B.I. Stepanov, E.V. Ivakin, A.S. Rubanov, Sov. Phy. Doki., 16, 1971.
4. A. Yariv, et al., "Theory and application of four-wave mixing in photorefractive media", IEEE Jour. on Quan. Elec., vol. QE-20, no.1, pp12~29, 1984
5. A. Yariv, "Phase conjugate optics and real-time holography", IEEE Jour. on Quan. Elec., vol. QE-14, pp650~662, 1978
6. M.Y. McCall and C.R. Petts, "Grating modification in degenerate four wave mixing," Opt. Comm. vol.53, pp7~12, 1985.

7. W.H. Kwon, K.Y.Lee, H.K.Park, "Real-time pattern recognizer using dynamic hologram," Proceeding of JC-MECOD, pp 199~203, Nov. 1988.
8. J.Feinberg, "Real-time edge enhancement using a photo-refractive effect," Opt. Let., vol.5, pp330~333, 1980.



**權元鉉 (Won Hyun KWON)** 正會員  
1962年8月10日生  
1983年2月：延世大學校 電子工學科 卒業  
1985年2月：延世大學校 大學院 電子工學科 卒業  
1986年2月～現在：延世大學校 大學院 電子工學科 博士過程

主關心分野는 光情報處理, Optical Computing, Optical Neural Network等임.



**李權淵 (Kwon Yeon LEE)** 準會員  
1959年11月19日生  
1986年2月：延世大 電子工學科 卒業 (工學士)  
1988年8月：延世大 大學院 電子工學科 工學碩士  
1988年9月～現在：延世大 產業技術研究所 研究員

主關心分野는 Four-wave Mixing, Optical Computing等임.



**吳昌錫 (Chang Suk OH)** 正會員  
1955年9月3日生  
1978年2月：延世大學校 電子工學科 卒業  
1980年2月：延世大學校 大學院 電子工學科 卒業 (工學碩士)  
1988年8月：延世大學校 大學院 電子工學科 (工學博士)  
1982年12月～1984年9月：電子通信研究所 研究員  
1985年3月～現在：忠北大學校 電子計算機 工學科 助教授

關心分野：Computer Network, Optical Signal Processing, Associative Memory等.



**朴漢奎 (Han Kyu PARK)** 正會員  
1941年6月21日生  
1964年2月：延世大學校 電氣工學科 卒業  
1968年2月：延世大學校大學院電氣工學科 卒業 (工學碩士)  
1973年：불란서 파리大學校 (소르본느大學校) 博士課程修了 (DEA)  
1975年：불란서 파리6 대학 (ph. D)  
1976年～現在：延世大學校 電子工學科 教授