

# 왜곡불변 광패턴인식을 위한 fSDF 위상필터에 관한 연구

## (A Study on the fSDF Phase Filter for a Distortion Invariant Optical Pattern Recognition)

全石熙\*, 殷在定\*\*, 權元鉉\*\*\*, 朴漢奎\*\*\*

(Seok Hee Jeon, Jae Jung Eun, Won Hyun Kwon, and Han Kyu Park)

### 要 約

본 연구는 광 패턴 인식에서 왜곡 불변 패턴을 인식하기 위한 fSDF/POF, BPOF 중첩 필터를 세 가지 경우에 대해 설계하고 각 입력에 대한 필터의 상관 반응을 분석하였다.

필터 합성을 위해 비선형 방정식의 해를 반복 과정 알고리즘을 통해 구하였으며 90° 방위각으로 out-of-plane 상에서 회전된 training 이미지에 대해 fSDF/POF, BPOF 필터의 특성을 구하였다. 종전의 pSDF와 상이한 점을 세 경우에 대해 비교하였으며 제안된 fSDF는 1.7%~4.0%의 오차범위 내에서 원하는 특정한 상관반응을 얻을 수 있고 침투상관치가 침투clutter 반응보다 큰 값으로 일정하게 유지됨을 확인하였다.

설계한 fSDF 공간 정합 필터는 광 상관기에서 공간적으로 회전 변형된 입력 패턴을 동일하게 인식하거나 두 종류의 클래스를 판별할 수 있음을 보였다.

### Abstract

A theory for the synthesis of a SDF including the filter modulation is suggested. In the filter synthesis, the iteration equation was used to iterate trial solution vectors. A computer simulation of the fSDF method using threshold binary images of the flight objects over a range of aspect angles was performed for POF and BPOF. The constructed fSDF filters are capable of obtaining the specified peak correlation response within a 1.7%-4.0% error range, after several iterations. However, the conventional pSDF/POFs, BPOFs are not.

The results indicate POFs and BPOFs can be made to perform well for distortion invariant optical pattern recognition using the fSDF method.

\*正會員, 東洋工業專門大學 通信工學科  
(Dept. of Comm. Eng., Dongyang Jr. Technical College)

\*\*正會員, 昌原大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Changwon Univ.)

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

接受日字: 1989年 9月 19日

(※ 본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구비 지원으로 이루어졌음.)

### I. 서 론.

1964년 Vander Lugt가 공간정합필터를 이용한 광 상관기를 구성한 이래 광패턴 인식을 위해 왜곡불변 필터를 설계하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>[1,2]</sup>

그중에서 SDF (synthetic discriminant function)에 의한 필터합성 방법은 크기, 회전, 3차원 회전등의 왜곡된 입력에 대해 인식 성능이 좋을 뿐만 아니라 서로 다른 클래스간의 분류에도 우수한 특성을 갖고 있다.<sup>[3,4]</sup> 또한, 위상필터 (POF; phase only filter)와

현존하는 프로그램 가능 SLM에 적용하기 용이한 이진위상필터(BPOF; binary phase only filter)는 Horner 효율이 매우 클 뿐만 아니라 상관 침두치의 크기가 매우 침예하게 나타나기 때문에 실시간 처리를 위해 공간 광 변조기에 적용하는 수단으로서 널리 이용되고 있다.<sup>5,6,7</sup>

그러나, SDF 알고리즘을 위상필터에 적용한 종전의 pSDF 방법은 training된 각 입력 패턴에 대해서 특정한 침두상관반응을 제공할 수 없을 뿐만 아니라 필터 합성 후 위상 변조를 함으로서 비선형 과정을 거치게 되어 인식 능력이 떨어지게 된다.<sup>8,9</sup> 따라서, 본 연구에서는 pSDF (projection SDF)에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해 SDF 합성시 필터변조 과정을 포함시킨 fSDF (filter SDF)<sup>10</sup>에 대한 알고리즘을 설명하고 90° 방위각에서 회전된 입력패턴과 설계한 필터와의 상관결과를 제시하고자 한다.

II. pSDF 이론

pSDF함수  $s(x, y)$ 를 구성하기 위한 training 입력 이미지의 집합을  $t_n(x, y), n=0, 1, \dots, 1$ 이라 하면,  $s(x, y)$ 에 대한 입력 이미지  $t_n(x, y)$ 의 요구되는 상관반응은 아래와 같이 된다.

$$c_n = \iint t_n(x, y) s(x, y)^* dx dy = \langle t_n(x, y) | s(x, y) \rangle \quad (1)$$

일반적으로  $s(x, y)$ 는 training된 이미지의 집합에 대한 선형조합으로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s(x, y) = \sum_{n=0}^1 a_n t_n(x, y) \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입함으로써 계수  $a_n$ 은

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} \quad (3)$$

이 된다. 여기에서  $\mathbf{A} = [a_0, a_1, \dots, a_L]^T$ ,  $\mathbf{R} = [c_0, c_1, \dots, c_L]$ 이고,  $\mathbf{R}$ 은  $R_{mn} = \langle t_m(x, y) | t_n(x, y) \rangle$ 의 요소를 갖는 상관행렬이다. pSDF 함수  $s(x, y)$ 는 식(3)을 풀어서 구한 계수들을 식(2)에 대입함으로써 결정되며, 그것의 공간정합필터  $S(u, v)$ 는

$$S(u, v) = F[s(x, y)]^* \quad (4)$$

이 된다. 따라서  $S(u, v)$ 를 광산관기의 필터 평면상에 구현하므로써 입력패턴  $t_n(x, y)$ 에 대한 상관반응을 얻을 수 있다.

III. 필터 변조를 포함한 fSDF 설계

일반적으로 SDF에 의해 구성된 공간정합필터는 복소수이기 때문에 특정한 상관반응  $c$ 를 얻기 위해

서는 연속적인 진폭위상필터 (CAPF; continuous amplitude phase filter)가 요구되고 있다.

그러나 실시간 처리를 위해 현존하는 프로그램 가능한 SLM에 기록되어지는 정보는 진폭 또는 위상의 양자화된 레벨로 제한되어 있다. 이러한 변조된 필터  $S'(u, v)$ 는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S'(u, v) = M[S(u, v)] \quad (5)$$

여기에서  $M$ 은 필터변조 연산자이다.

표1에는 POF, BPOF, CAPF에 대한 필터변조 연산자  $M$ 에 대한 정의를 나타내고 있다.

표 1. 필터변조 연산자에 대한 정의  
Table 1. Definitions for the filter modulation operator.

필터변조	필터변조 연산자
POF	$S'(u, v) = S(u, v) /  S(u, v) $
BPOF	$S'(u, v) = \begin{cases} 1: \text{Real}[S(u, v) \exp(i\phi)] > 0 \\ -1: \text{otherwise} \end{cases}$
CAPF	$S'(u, v) = S(u, v)$

필터 변조된 SDF 구성과정으로 통합하기 위한 상관반응은 식(1)로부터

$$\langle t_n(x, y) | s'(x, y) \rangle = c_n \quad (6)$$

이 된다. 여기에서  $s'(x, y)$ 는 필터  $S'(u, v)$ 의 역푸리에 변환이다.

즉  $s'(x, y) = F^{-1} M F [s(x, y)]^*$ 으로써 임펄스 응답을 의미한다. 특정한 침두치 상관반응을 얻기 위해 상관기에서 사용되어야 하는 실제 필터는 SDF 합성과정에서 포함되어야 한다.

식(2)를 식(6)에 대입함으로써 일반적인 SDF 합성 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\langle t_n(x, y) | F^{-1} M F \sum_{m=0}^1 a_m t_m(x, y) \rangle = c_n \quad (7)$$

식(7)에서  $a$ 에 대한 해가 존재한다면 어떤 필터에 대해서도 특정한 상관반응을 얻을 수 있다. 이러한 방식으로 SDF 합성 과정에서 필터변조를 고려하여 구성된 중첩 필터를 fSDF (filter SDF)라고 한다.<sup>10</sup>

POF인 경우에는 식(7)은 다음과 같은  $a$ 에 대한 비선형 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\sum_{m=0}^1 a_m^* \langle t_n(x, y) | F^{-1} \left| \frac{T_m(u, v)}{\sum_{p=0}^1 a_p T_p(u, v)} \right| \rangle = c_n \quad (8)$$

여기에서  $T_m(u, v) = F[t_m(x, y)]$ 이다.

필터변조가 위상만의 함수로 되어 있는 경우에 대해서 계수  $a$ 의 해를 구하기 위해 다음과 같은 반복 과정 알고리즘을 적용하였다.

$$a_n^{i+1} = a_n^i + \beta [c_n - c_o (\frac{m_n^i}{m_o})] \quad (9)$$

여기에서  $i$ 는 반복횟수,  $\beta$ 는 damping 상수로서 임의의 값으로 주어진다. 본연구에서는  $\beta$ 는 0.3으로 하였다.  $m_n$ 는 계수벡터  $a$ 로부터 구성된 필터와 training 이미지  $t_n(x, y)$ 와의 침투 상관율로서

$$m_n^i = \langle t_n(x, y) | s'(x, y, a^i) \rangle \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있으며 반복과정에 대한 초기값은 상수로 하였다. 즉  $a=c$ 가 된다. 따라서 식(7)에서 계수  $a$ 는 식(9)와의 반복 과정을 거치므로 원하는 상관 반응으로 수렴되도록 하며 적절한 오차 범위를 갖는 fSDF 필터를 합성할 수 있다. 이와 같은 과정을 거쳐 설계된 필터  $S'(u, v)$ 는 CGH(computer generated hologram)나 공간 광 변조기상에 구현할 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 사용된 training 이미지들은 3차원 패턴인식에서는 매우 어려운 90°의 방위각도로 out-of-plane 상에서 회전된 비행기의 이미지이다. 0°부터 180°까지 20°씩 증가 시키면서 카메라로부터 받은 10개의 512×512 이미지를 64×64로 줄이고, 256 레벨의 계조도를 이진화하였다.

0°, 60°, 120°, 160° 회전된 입력패턴에 대한 training 이미지의 예를 그림(1)에 보여주고 있다.

침투 상관반응  $P$ 는 상관평면  $(x, y) = (0, 0)$ 에서의 빛의 세기로 정의하고, 침투 clutter 반응  $C$ 는 침투치 주위의 5×5 영역(B) 밖의 최고 상관세기로 정의하였다.

즉,

$$P = |c(0, 0)|^2, \quad C = \max_{(x, y) \in B} |c(x, y)|^2 \quad (11)$$

이 된다.

필터의 반응에 대한 특성을 알기위해 다음의 세 경우에 대해서 pSDF와 fSDF의 특성을 비교하였다.

Case 1.  $c_n = 1$

Case 2.  $c_n = \exp(-n/20) + \exp[-(n-9)^2/20]$

Case 3.  $c_n = \begin{cases} 1 & \text{true 클래스 : 0°에서 90° 회전된 이미지} \\ 0 & \text{false 클래스 : 100°에서 180° 회전된 이미지} \end{cases}$

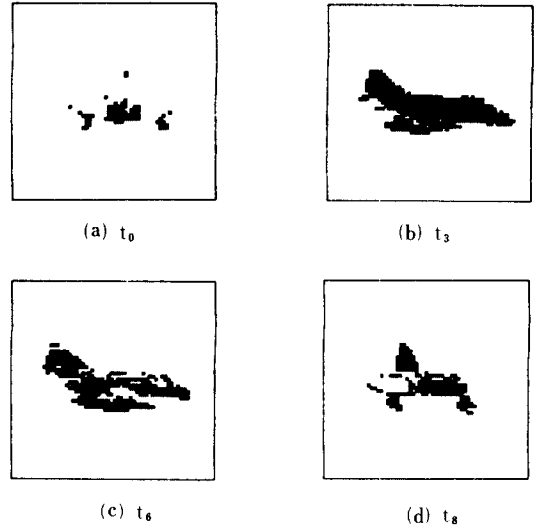


그림 1. 시뮬레이션에 사용한 회전된 training 이미지의 예

(a) 0° (b) 60° (c) 120° (d) 160°

Fig. 1. Examples of the out-of-plane-rotated training images.

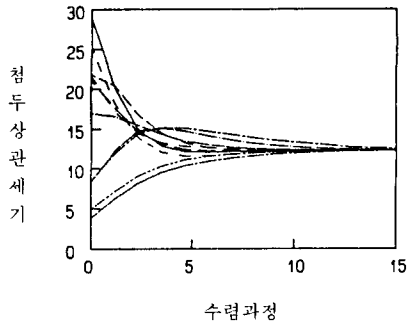
(a) 0°. (b) 60°. (c) 120°. (d) 160°.

Case 1은 동일한 상관 침투치(ECP:equal correlation peak)인 경우 즉, 변형된 서로 다른 이미지에 대해서도 동일한 상관값을 갖도록 한 경우이고, case 2는 다단계 레벨을 갖는 경우 즉, 상관값을 다섯 레벨로 나누어 서로 다른 상관 반응을 얻도록 한 경우이고, case 3는 두 클래스 간의 판별에 각각 대응하도록 하였다. True 클래스인 경우 중앙 상관값은 크게 나타나고 false 클래스는 0이 되도록 설계하였다.

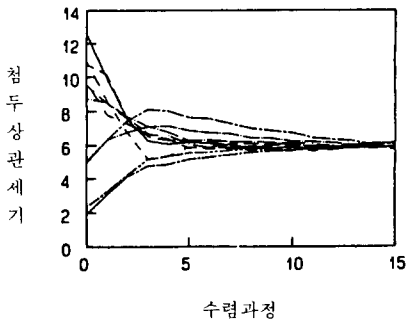
식(7)과 (9)로부터 case 1인 경우 POF와 BPOF에 대한 침투 상관값이 수렴해 가는 과정을 plot한 결과를 그림(2)에 보였다. 약 15번의 반복 과정 후에 각 training 이미지와 fSDF함수와의 상관반응에 대한 오차는 POF일 때에는 1.7%, BPOF일 때는 4.0% 이내의 값을 얻을 수 있었다.

각 경우에 대해서 오차가 최소값이 되도록 반복 과정을 수행한 후 fSDF/POF, BPOF의 침투 상관치와 침투 clutter반응에 대한 결과를 그림(3)에 보이고 있다. 비교하기 위해서 그림(4)에는 종전의 pSDF/POF, BPOF를 사용한 필터의 침투 상관치와 침투 clutter 반응에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 fSDF는 원하는 상관반응(case1, 2, 3)에 매우 근접한 상관값을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 침투 clutter 반응보다 큰 값으로 일정하



(a) case 1, fSDF/POF



(b) case 1, fSDF/BPOF

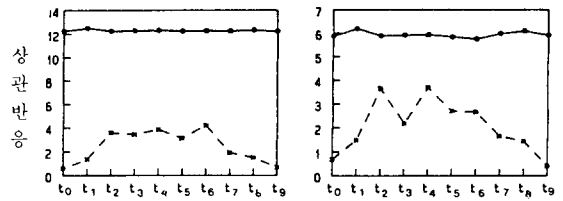
그림 2. POF와 BPOF(case1)에 대한 첨두상관반응의 수렴과정

Fig. 2. Convergence of iterating to the desired filter response (case 1) for a POF and BPOF.

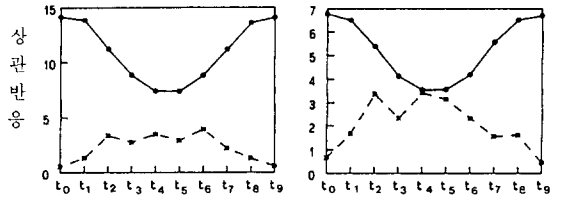
게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 기존의 pSDF에 의한 방법은 인식이 극히 낮을 뿐만 아니라 요구하고 있는 특정한 상관 값을 유지하지 못하고 있으며 모든 case에 대해 대부분 첨두상관치가 첨두 clutter 보다 낮게 나타났다. 그림 3에서 case1인 경우 회전된 서로 다른 이미지에 대해서도 거의 일정한 상관 반응을 유지함을 알 수 있으며 이것은 임의의 변형된 패턴에 대해서도 적용할 수 있으리라 생각한다.

그림(5)에는 pSDF, fSDF/BPOF의 true클래스(예로서 40° 회전된 입력)와 false클래스(예로서 120° 회전된 입력)에 대한 출력평면상의 상관패턴을 3 차원으로 나타내었다.

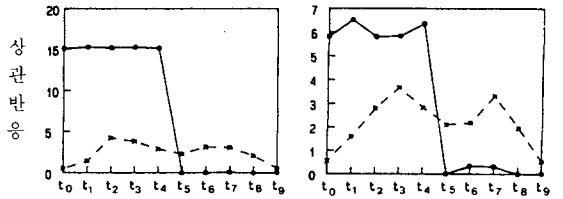
fSDF에 의한 위상정합 필터의 상관 출력은 class 간의 분별이 뛰어날 뿐만 아니라 상관 패턴의 모양도 매우 첨예하게 나타남을 알 수 있다.



(a) case 1, fSDF/POF (b) case 1, fSDF/BPOF



(c) case 2, fSDF/POF (d) case 2, fSDF/BPOF



(e) case 3, fSDF/POF (f) case 3, fSDF/BPOF

그림 3. POF와 BPOF에 대해서 fSDF 방법을 사용한 첨두상관반응과 첨두 clutter 반응  
Fig. 3. Peak-correlation and peak-clutter response using the fSDF method.

V. 결 론

본 연구에서는 SDF필터 합성시에 필터변조 과정을 포함하는 fSDF 공간정합 필터를 설계하였다.

POF와 BPOF인 경우에 비선형 방정식으로부터 계수 a를 구하기 위해 반복과정 알고리즘을 적용하여 특정한 상관반응을 얻도록 하였으며 90°의 방위 각을 갖는 회전된 training 이미지에 대해서 기존의 pSDF보다 상관응답이 매우 우수하다는 것을 시뮬레이션 결과 확인하였다.

따라서 임의의 필터 변조에 대해서 왜곡불변 패턴 인식을 위한 공간정합필터를 설계하기 위해서는 SDF 합성시에 필터변조 과정을 반드시 포함시켜야 한다. POF와 BPOF에 대한 좋지않은 연구보고들은 본질적으로 위상필터의 결합 때문이 아니라 위상필터를 적용한 종래의 pSDF 방법의 부적합성 때문이었다.

그러므로 인식이 좋은 SDF위상필터를 얻기 위해서는 필터변조를 고려한 fSDF 방법을 사용해야 하며 이것은 임의의 왜곡불변 패턴인식에도 적용할

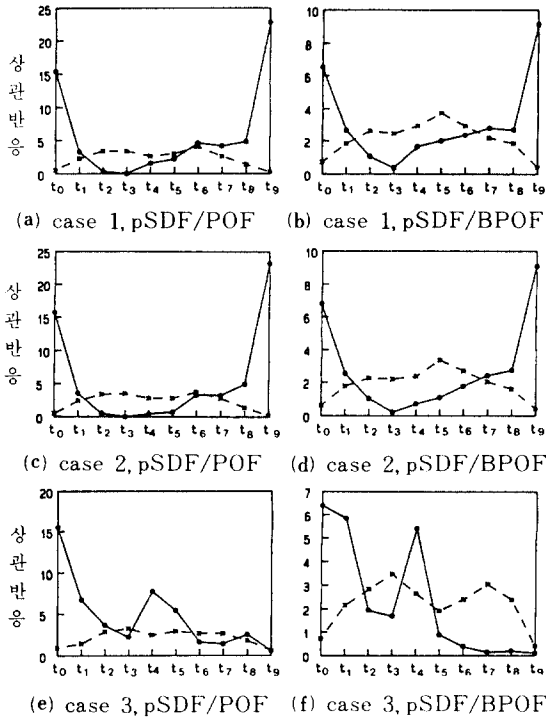


그림 4. POF와 BPOF에 대해서 pSDF 방법을 사용한 침두상관반응과 침두 clutter 반응  
 Fig. 4. Peak-correlation abs peak-clutter response using the pSDF method.

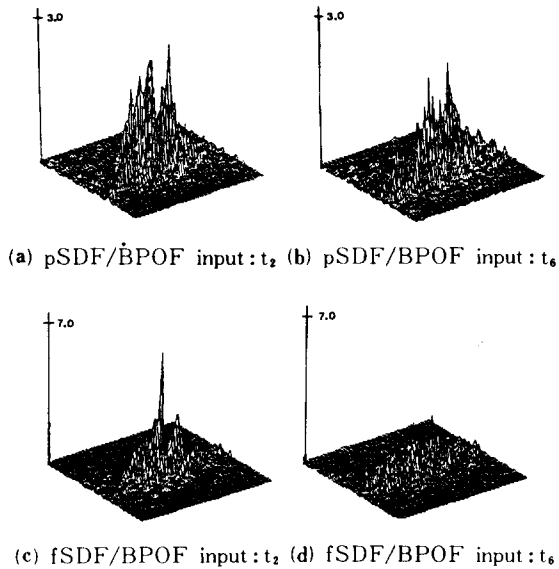


그림 5. Case3에 대한 pSDF, fSDF(BPOF)의 true클래스와 false 클래스 상관출력  
 Fig. 5. Examples of correlation outputs for the pSDF, fSDF (BPOF) for case3.

수 있으리라 생각한다.

그러나 false 클래스 판별시 중앙 근처에 비교적 큰 값이 나타나며 이러한 오인 확률을 줄이기 위해서는 상관 분포 전체를 제어할 수 있는 알고리즘을 병행하여 연구하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

- [1] A. Vander Lust, "Signal Detection by complex spatial filtering," *IEEE Tran. Inf. Theory IT-10*, p. 139, 1964.
- [2] G.F. Schilsand D.W. Sweeney, "Rotation invariant correlation filtering," *J. Opt. Soc. Am.*, A2, p. 1411, 1985.
- [3] D.P. Casasent, "Unified synthetic discriminant function computational formulation," *Appl. Opt.*, 23, p. 1620, 1984.
- [4] J. Riggins and S. Buttler, "Simulation of synthetic discriminant function optical implementation," *Opt. Eng.*, 23, p. 721, 1984.
- [5] J.L. Horner and P.D. Gianino, "Phase only matched filtering," *Appl. Opt.*, 23, p. 812, 1984.
- [6] J.L. Horner and J.R. Leger, "Pattern recognition with binary phase only filter," *Appl. Opt.*, 24, p. 609, 1985.
- [7] D. Psaltis and E.G. Baek and S.S. Venkatesh, "optical Image Correlation with a Binary spatial light modulator," *Opt. Eng.*, 23, p. 698, 1984.
- [8] J.L. Horner and P.D. Gianino, "Applying the phase only filter concept to synthetic discriminant function correlation filters," *Appl. Opt.*, 24, p. 851, 1985.
- [9] D.P. Casasent and W.A. Rozzi, "Computer generated phase only synthetic discriminant function filters," *Appl. Opt.*, 25, p. 3767, 1986.
- [10] A. Jared and D.J. Ennis and S.A. Dreskin, "Evaluation of binary-phase-only-filters for distortion invariant pattern recognition," *Proc. SPIE 884*, p. 139, 1988.

---

 著 者 紹 介
 

---



全 石 熙 (正會員)

1960年 8月 16日生. 1981年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1983年 2月 연세대학교대학원 전자공학과 졸업. 1983年 3月 ~ 현재 연세대학교대학원 전자공학과 박사과정. 1986年 3月 ~ 현재 동양

공업전문대학 통신공학과 조교수. 주관심분야는 광센서, 광신호 처리, 광 컴퓨팅 등임.



殷 在 定 (正會員)

1959年 5月 25日生. 1982年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1986年 8月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1986年 ~ 현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 1989

年 ~ 현재 국립 창원대학 전자공학과 전임강사. 주관심분야는 광정보처리, 광컴퓨터, 신경회로망 등임.

●  
權 元 鉉 (正會員) 第26卷 第4號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 박사과정 재학중

●  
朴 漢 奎 (正會員) 第26卷 第4號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수