

## 광 패턴 인식을 위한 pSDF와 이진 결합 변환 상관기의 구현

正會員 鄭 倉 圭\* 正會員 金 南 秀\* 正會員 趙 東 來\* 正會員 朴 漢 奎\*

### An Implementation of pSDF and Binary Joint Transform Correlator for Optical Pattern Recognition

Chang Kyoo JUNG\*, Nam Soo KIM\*, Dong Rae CHO\*, Han Kyu PARK\* *Regular Members*

**要 約** 본 논문에서는 pSDF (projection synthetic discriminant function) 공간불변 필터 개념을 적용하여 기준 이미지를 구현하고, 공간 평면 상관기인 이진 결합 변환 상관기를 이용하여 동일 클래스 인식을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 이진 결합 변환 상관기가 기존의 결합 변환 상관기보다 상관 첨두치 세기, 상관 첨두치 세기대 부로브비, 신호대 잡음비, 상관폭 부분에서 뛰어난 상관 특성을 보였다.

이진 결합 변환상관기를 이용한 광 패턴 인식 실험을 한 결과, 동일 클래스 인식인 경우 4.1~9.6% 오차 범위내에서 상관 첨두치 세기가 일정하게 나타났다.

**ABSTRACT** In this paper, pSDF-based reference image is realized. Using BJTC(binary joint transform correlator) as the spatial plane correlator, optical pattern recognition for intraclass identification is performed. Computer simulation shows that the correlation performance of BJTC is superior to that of JTC. Experimental results using BJTC reveal that correlation peak intensity is constant within the error range from 4.1% to 9.6% in intraclass identification.

#### I. 서 론

1964년 Vander Lugt<sup>(1)</sup>가 빛의 코히어런트한 성질을 이용한 공간 정합 필터 제작 방식을 제안

함으로써 시작된 광 패턴 인식은 공간 정합 필터 이론에 기반을 둔 주파수 평면 상관기와 입력평면에 기준 이미지와 입력 이미지를 나란히 놓는 공간 평면 상관기로 나눌 수 있으며<sup>(2)</sup>, 공간 평면 상관기인 이진 결합 변환 상관기(BJTC : binary joint transform correlator)는 주파수 평면 상관기에 비해 광학적인 구성이 간단하고 상관 첨두치 세기가 크며, 또한 상관폭이 훨씬 작다<sup>(3)</sup>.

\*延世大學校 電子工學科  
Dept. of Electronics, Yonsei University .  
論文番號 : 90-68 (接受 1990. 7. 3)

1987년 Yu<sup>(4)</sup>는 공간 주파수 평면에 공간 광 변조기(SLM : spatial light modulator)를 도입하여 실시간 처리를 하였으며, 1989년 Horner<sup>(5)</sup>는 하나의 이미지를 기준 이미지로 하여 입력 이미지와의 상관 특성을 연구하였다. 1989년 Javid<sup>(6)</sup>는 인식해야될 이미지들을 입력 평면에 배열한 기준 이미지를 선택하여 회전 불변 패턴 인식을 하였다. 그러나 입력 평면에 여러 이미지를 배열할 경우 배열 간격에 의해 상관 평면에서 원치않는 상관 특성이 발생하여 오인하는 경우가 발생한다<sup>(7)</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 주파수 평면 상관기에서 적용된 pSDF 필터 합성 이론을 이용하여 표본 학습 이미지의 선형 조합으로 기준 이미지를 구현하였으며 주파수 평면에서의 이진화를 위해 기존의 결합 변환 상관기(JTC : joint transform correlator)와 달리 연속 위상을 이진레벨로 한정시킨 이진 위상 필터 합성법을 이용하였다.

(1) pSDF 공간 불변 필터 특성

SDF는 초월 공간(hyperspace) 내에서 특정 벡터로 각 입력 이미지를 나타내며, 판별하려는 두 클래스의 구성 이미지들은 초월 공간 내에서 분리되어져 있고, 각 클래스 내의 이미지는 밀집해 있어서, 서로 다른 클래스에 속해 있는 이미지의 판별이나 동일 클래스 내의 변형된 입력 패턴을 인식할 수 있다.

일반적으로 필터 함수를  $h(x, y)$ , 클래스 내의 학습(training) 이미지를  $\{f_n(x, y)\}$ 라고 하면

$$f_n(x, y) \otimes h(x, y) = 1 \tag{1}$$

과 같이 상관 출력이 일정한 결과를 얻는다<sup>(8)</sup>. 여기서  $\otimes$ 는 상관(correlation)을 나타낸다. 식(1)을 만족하는 필터 함수는

$$h(x, y) = \sum_m e_m f_m(x, y) \tag{2}$$

이 된다. 여기서  $e_m$ 은

$$E = R^{-1} \cdot U \tag{3}$$

II. pSDF와 이진 결합 변환 상관기

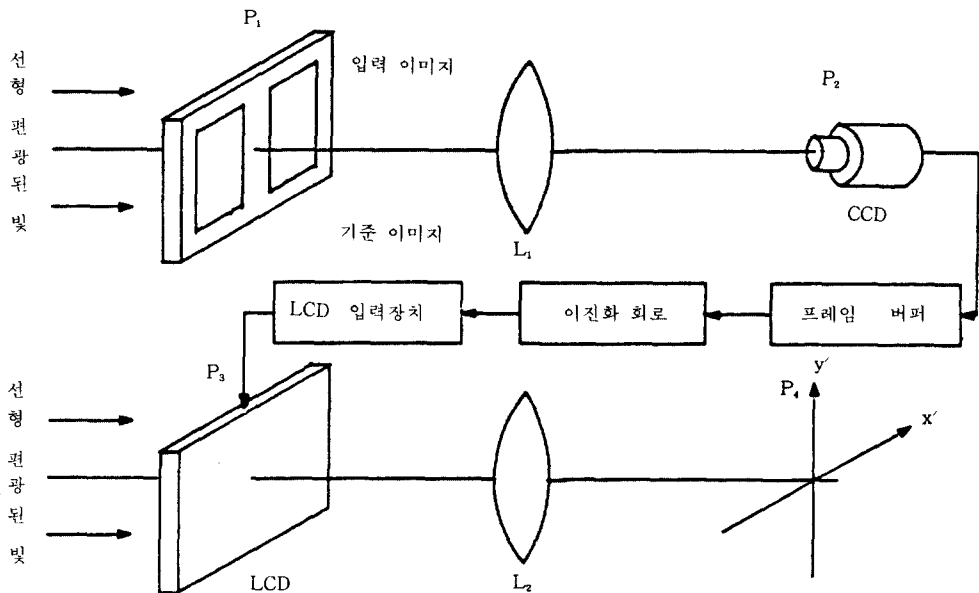


그림 1. 이진 결합 변환 상관기  
Binary joint transform correlator

이 되고, 여기서  $R$ 은 학습 이미지의 상관 행렬,  $U$ 는 상관 출력 벡터이며  $\mathbb{E}$ 는 가중치 벡터이다. 따라서 SDF는 학습 이미지의 선형 조합으로 표현됨을 알 수 있다.

동일 클래스 인식을 위한 pSDF인 경우, ECP SDF(equal correlation peak SDF)를 적용시켜 상관 출력 벡터  $U_{ECP}$ 의 원소는 모두 '1'로서 일정한 상관 출력을 낸다.

(2) 이진 결합 변환 상관기와 기준 이미지의 설계

그림 1에서 입력 평면  $P_1$ 에 있는 공간 광 변조기에 기준 이미지와 입력 이미지  $r(x, y)$ ,  $s(x, y)$ 가 1과 -1로 이진화되어  $2x_0$  간격을 두고 놓여져 있을 때 주파수 평면  $P_2$ 에 푸리에 변환된 두 이미지의 간섭에 의한 빛의 세기 분포가 나타난다<sup>9)</sup>.

본 논문에서는 빛의 이용 효율 향상과 이진화를 위하여 기준 이미지와 입력 이미지의 자기 상관항에 해당하는 DC성분을 제거한 다음, 이진 회로에 입력시켰다. 이 때 빛의 세기 분포는

$$\begin{aligned}
 I(u, v) &= R(u, v)S^*(u, v)\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda f} 2x_0u) \\
 &+ R^*(u, v)S(u, v)\exp(+\frac{2\pi}{\lambda f} 2x_0u) \\
 &= 2||R(u, v)||S(u, v)||\cos[\phi_R(u, v) \\
 &- \phi_S(u, v)+2x_0u] \quad (4)
 \end{aligned}$$

이 된다. 여기서  $(u, v)$ 는 공간 주파수 좌표,  $R(\cdot)$ ,  $S(\cdot)$ 는 각각 입력 신호  $r(x, y)$ ,  $s(x, y)$ 의 푸리에 변환 함수,  $f$ 는 푸리에 변환 렌즈의 초점 거리,  $\lambda$ 는 사용한 코히어런트 광의 파장이며,  $*$ 는 공액 복소수를 의미한다. 식(4)의 위상 항에는 기준 이미지와 입력 이미지의 위상 함수  $\phi_R$ ,  $\phi_S$ 가 포함되어 있으므로 이진 위상 필터 합성시 요구되는 필터 변조 이론을 이용하여 이진화를 할 수 있다.

이진화된 빛의 세기 분포  $I'(u, v)$ 는  $I(u, v)$ 를 변조함으로써 얻을 수 있다.

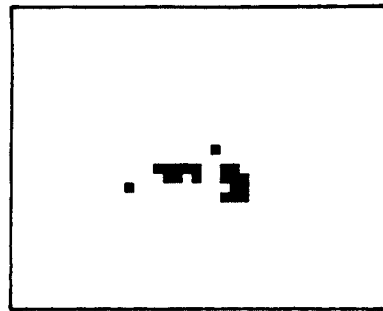
$$I'(u, v) = M[I(u, v)] \quad (5)$$

여기서  $M$ 은 필터 변조 연산자로서

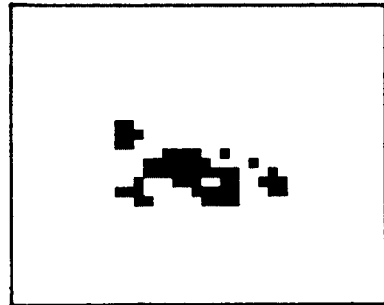
$$I'(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{Re}[I(u, v)] > 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

로 정의되어, 실수축 상의 값을 가지는 빛의 세기 분포  $I(u, v)$ 는 1과 -1을 갖는  $I'(u, v)$ 으로 대응시킬 수 있다.

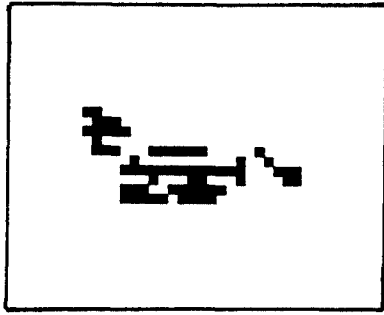
본 논문에서 사용된 표본 학습 이미지들은 90°의 방위각을 갖는 비행 물체를 out-of-plane 상에서 좌우로 20°씩 회전시킨 5개의 이미지이며 32×32의 해상도를 갖도록 하였다. 기준 이미지는 동일 클래스 인식인 경우 5개의 회전된 비행 물체를 동일한 물체로 인식하기 위해서 ECP SDF 합성법을 이용하였다.



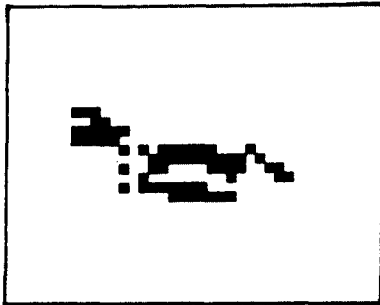
(a)  $t_1$



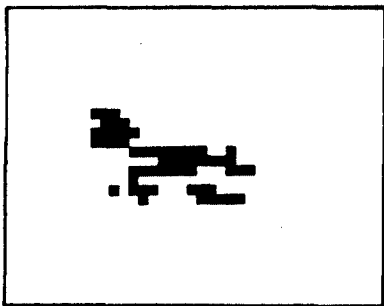
(b)  $t_2$



(c)  $t_3$



(d)  $t_4$



(e)  $t_5$

그림 2. 이진화된 표본 학습 이미지  
Binarized training images

또한 기준 이미지는 0~255의 계조도를 갖는 표본 학습 이미지를 먼저 정규화한 다음 이 값의 히스토그램을 크기 순서대로 분류하여, 그 중앙값 (median value)을 문턱값 (threshold value)

으로 하여 정규화한 표본 학습 이미지를 이진화한다. 기준 이미지 합성을 위한 5개의 이진화된 표본 학습 이미지는 그림 2와 같다.

또한, 상관 출력 벡터는 동일 클래스 인식인 경우

$$U_{ECP} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (7)$$

로 주어진다. 따라서 식 (3)과 식 (2)을 이용하여 가중치 벡터와 기준 이미지를 구한 후, 1과 -1을 이진화하면 그림 3과 같다.

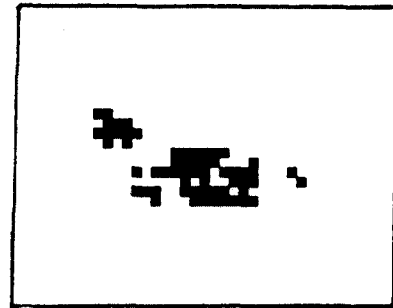


그림 3. 기준 이미지  
Reference image

### III. 광 패턴 인식 시스템 구성 및 실험

#### (1) 액정 표시 소자의 광 변조 실험

빛의 세기를 이진 위상 변조시키기 위해서 본 논문에서는 액정 표시 소자(LCD)를 공간 광 변조기(SLM)로 이용하였다.

이진 위상 변조 이론에 의하면 편광이 ON 상태와 OFF 상태에서 두 출력 광의 진폭은 같고, 위상이  $\pi$  rad의 홀수배가 되도록 하여야 한다. 본 논문에서 사용한 액정 표시 소자는 외부 비디오 입력 단자를 가지고 있는 Radio Shack사의 Realistic Model 16-156 액정 TV (LCTV : liquid crystal TV)이다.

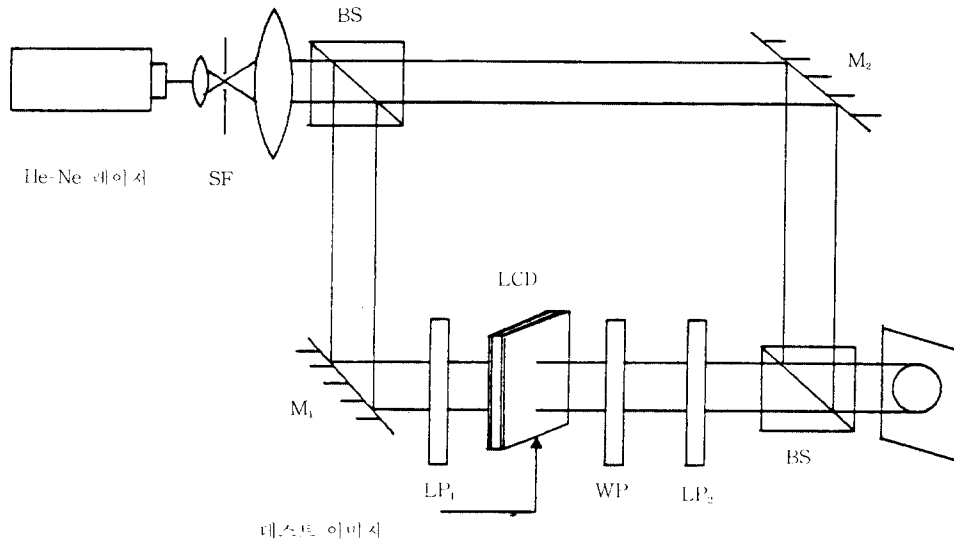
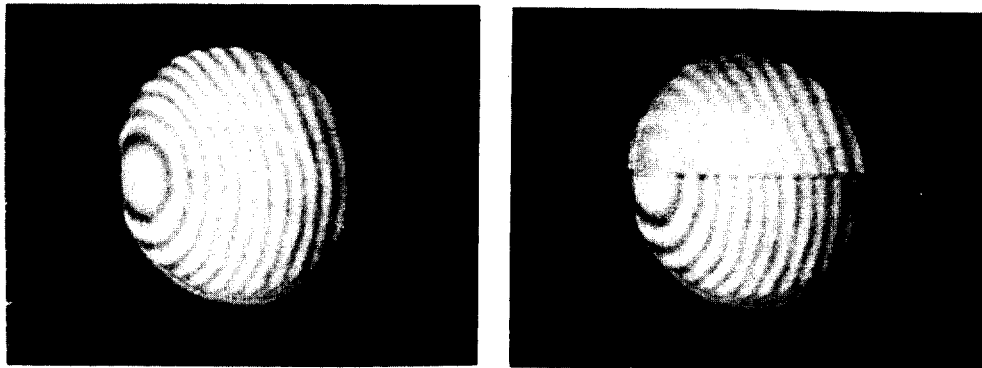


그림 4. 이진 위상 변조 실험을 위한 Mach-Zehnder 간섭계 구성도  
Mach-zehnder interferometry for binary phase modulation



(a) 입력이 '0'일 때 (b) 입력이 '0'과 '1'일 때  
사진 1. 이진 위상 변조 조건일 때 Mach-Zehnder 간섭계의 간섭 무늬 패턴  
Interference fringe pattern in binary phase modulation condition

액정 표시 소자의 이진 위상 변조 조건을 확인하기 위하여 그림 4와 같은 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 위상차를 측정하였다.

액정 표시 소자에 '0'과 '1'로 된 테스트 패턴을 입력시켰을 경우, '0'인 정보에 의한 간섭 무늬와 '1'인 정보에 의한 간섭 무늬의 위상차가  $\pi$  rad 이 되어 간섭 무늬의 모양이 서로 엇갈리게 나타나며 동시에 '1'인 부분과 '0'인 부분의 빛의 세기

가 동일하도록 편광기 (polarizer),  $\lambda/4$  위상판, 검광기 (analyzer), 액정 표시 소자의 휘도 조절기를 조합하여 조절함으로써 이진 위상 변조 조건을 구하였다.

### (2) 광 상관기의 구성

이진 결합 변환 상관기를 광학적으로 구현하기 위해서 상관 평면  $P_3$ 에 공간 광 변조기인 액정

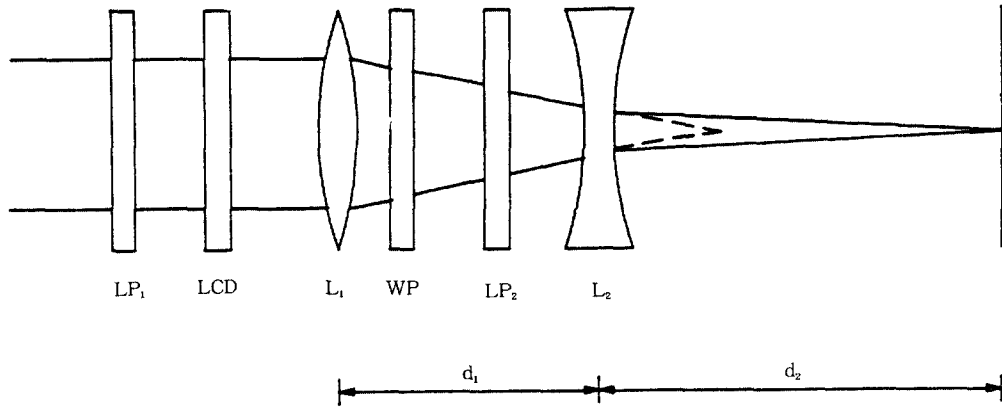


그림 5. 광 상관기 구성도.  
Schematic diagram of optical correlator

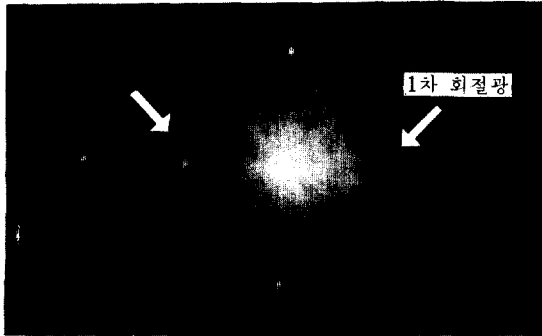
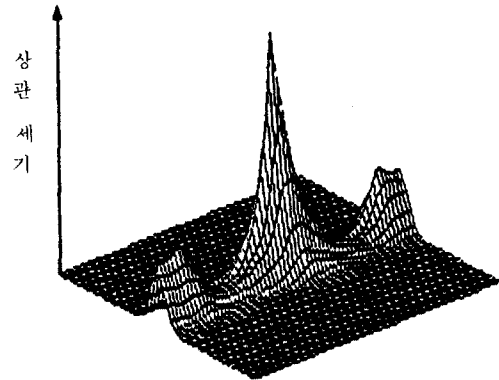


사진 2. 액정 표시 소자의 격자 패턴에 의한 Fraunhofer 회절 패턴  
Fraunhofer diffraction pattern of the grid of LCD

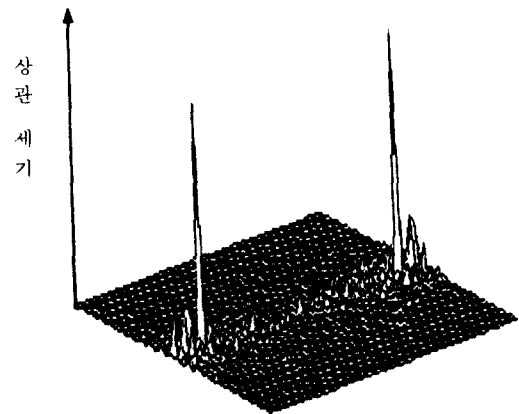


(a) 결합 변환 상관기

표시 소자를 설치하였다.

블록 렌즈만으로 푸리에 변환을 할 경우 상관 출력 평면에서의 상관 신호는 액정 표시 소자의 격자 구조에 의한 Fraunhofer 회절 패턴이 조밀하게 나타나서 액정 표시 소자의 입력 신호에 의한 회절 패턴만을 분간해 낼 수 없다. 따라서 블록 렌즈와 오목 렌즈를 조합하여 푸리에 변환을 해야 한다.

본 논문의 광 상관기 구성에 사용한 렌즈  $L_1$  과  $L_2$ 의 초점 거리는 각각  $f_1=54$  mm,  $f_2=-15$ mm이고, 렌즈 간격은  $d_1=40$ cm,  $d_2=221$  cm가 된다. 그리고  $LP_1$ 과  $LP_2$ 는 편광기와 검광기이고, WP는  $\lambda/4$  위상 지연판으로서 이진 위상 조건을 만족하도록 조절하였다.



(b) 이진 결합 변환 상관기

그림 6. 동일 클래스 패턴 인식의 상관 출력  
Correlation performance of class identification

위의 조건에서 순수한 액정 표시 소자의 격자 패턴에 의한 회절 패턴을 사진 2에 나타내었다. 1차 회절광은 렌즈 조합의 결과로 중심의 DC 성분광에서 상당히 떨어져 존재하게 된다.

(3) 상관 특성의 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션은 PC / AT와 matlab 소프트웨어를 사용하였고, 2-D FFT 해상도는 64×64로 하였다. 결합 변환 상관기와 이진 결합 변환 상관기의 상관출력 특성을 비교하기 위하여 ECP SDF 기준 이미지를 이용한 동일 클래스 인식인 경우의 대표적인 예로 기준 이미지와  $t_3$  표본 학습 이미지와의 상관 출력 결과를 그림 6에 나타내었다.

시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 정리하면 표1과 같다.

표 1 동일 클래스 패턴인식의 경우 JTC와 BJTC의 비교.  
Comparison between JTC and BJTC in class identification

상관 특성	$R_o^2$	PSR	SNR	FWHM	CW
JTC	1.55	0.94	8.55	(10, 19)	(12, 32)
BJTC	$1.48 \times 10^4$	2.67	14.51	(1, 1)	(1, 2)
향상도(배)	$9.55 \times 10^3$	2.84	1.70	14.50	14.70

여기서

$R_o^2$  : 상관 첨두치 세기

PSR : 상관 첨두치 세기와 최대 상관 부로브 세기

FWHM : 상관 세기가 상관 첨두치 세기의 1/2 이상되는 지점이 점유하는 상관폭 (full correlation width)

CW : 상관 첨두치 세기가 최소되는 지점까지의 상관폭

SNR : 상관 첨두치 진폭과 잡음 진폭의 rms 값.

표에서 알 수 있듯이 기존의 결합 변환 상관기보다 이진 결합 변환 상관기가 상관 첨두치 세기에서  $9.55 \times 10^3$ 배 더 크게 나타남으로 같은 레이저 광원을 사용하여 상관 출력을 검출하는 경우 광 검출기의 출력 전압이  $9.55 \times 10^3$ 배 더 크므로 검출시 발생하는 잡음의 영향을 줄이는데 효과적이다.

또한 상관폭의 경우 이진 결합 변환 상관기의 상관폭이 (1, 1) 화소로 임펄스와 같은 첨예한 상관 첨두치 특성을 나타내었다.

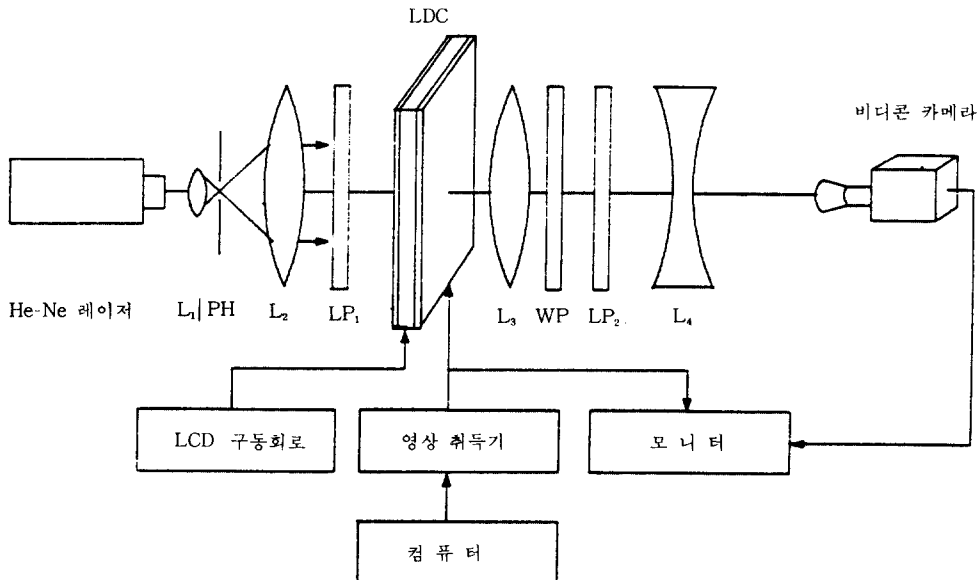


그림 7. 광 패턴 인식 시스템의 구성도  
Optical pattern recognition system

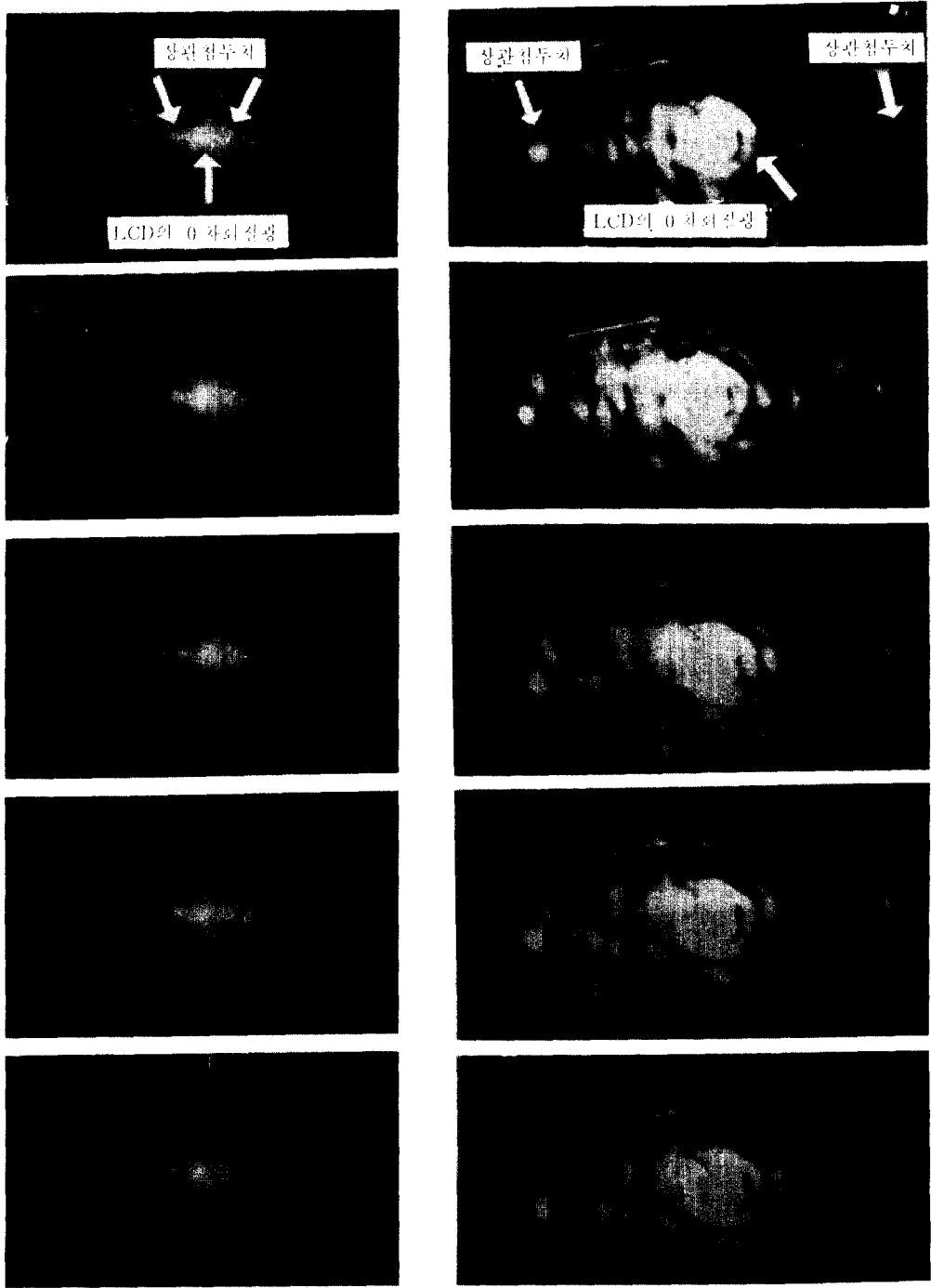


사진 3. 동일 클래스 인식을 위한 광 패턴 인식 실험 결과  
Experimental results of optical pattern recognition for intra-class identification



(4) 광 패턴 인식 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 프로그램을 통한 제어, 데이터 해석, 특징 추출등의 디지털 처리가 갖는 장점과, 고속성과 높은 병렬성 등의 광학적 처리가 갖는 장점을 혼합시켜 패턴 인식 시스템을 구성하였다.

실험에 사용한 광 패턴 인식 시스템의 구성도는 그림 7과 같다. 레이저의 출력광은 렌즈 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>와 편광기 PH에 의해 평행광이 되어 액정 표시 소자 LCD에 조사되며 편광기 LP<sub>1</sub>과 λ/4 위상판 WH, 검광기 LP<sub>2</sub>는 이진 위상 조건을 만족하도록 조절하였다. 컴퓨터의 메모리에 있는 기준 이미지와 표본 학습 이미지를 이용하여만든 공간 주파수 평면의 빛의 세기 분포는 영상 취득기를 통하여 액정 표시 소자에 입력되고 렌즈 L<sub>2</sub>와 L<sub>3</sub>에 의해 푸리에 변환되어 상관 패턴이 상관 평면에 나타나게 된다. 이 때 상관 평면에 놓여 있는 비디콘 카메라로 잡은 상관 패턴을 모니터 상에 보여 준다.

광원으로 파장이 0.6238 μm이고 실제 출력 5.7 mW인 NEC사의 GLG 5700 He-Ne 레이저를 사용하였으며 공간 광 변조기로는 Radio Shack 사의 16-156 액정 TV를 사용하였다. 상관 출력의 검출은 OPC사의 비디콘 카메라를 사용하였고, 표본 학습 이미지는 CCD 카메라로 받은 512×480의 해상도를 갖는 이미지를 32×32로 줄인 이미지이다. 또한 영상 취득기는 Imaging Technology사의 ITEX PC-Plus를 사용하였다.

사진 3은 포본 학습 이미지(t<sub>1</sub>~t<sub>5</sub>) 전체를 동일한 물체로 인식하는 동일 클래스 패턴 인식 결과이다.

왼쪽 사진은 상관 출력 평면에 카메라를 장치하고 자동 노출시켜 촬영하였으며 오른쪽 사진은 동일한 상관 출력을 비디콘 카메라를 통해 모니터에 나타난 영상을 촬영한 결과이다. 중앙에는 액정 표시 소자의 격자 구조에 의한 DC 성분 광이 존재하고 DC 성분과 1차 성분 광 사이에 원하는 상관 성분이 나타났다. 왼쪽 사진에서 알 수 있듯이 5개의 학습 이미지 모두 첨예한

상관 특성을 나타내어 동일한 클래스로 판별하였고, 오른쪽 사진은 왼쪽 사진의 확대된 모습이다.

실험 결과 나타난 상관 특성을 조사하기 위하여 모니터에 나타난 상관 첨두치의 계조도 값을 비교하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 상관 첨두치 출력 측정 결과

Gray level value measurement of correlation peak intensity

입 력	동일 클래스 인식
t <sub>1</sub>	120
t <sub>2</sub>	140
t <sub>3</sub>	154
t <sub>4</sub>	160
t <sub>5</sub>	155
평 균	146 오차 4.1~9.6%

동일 클래스 인식인 경우 4.1~9.6% 오차 범위 내에서 상관 첨두치 세기가 일정하게 유지되어 동일 클래스로 인식함을 알 수 있다. 여기서 오차는 평균 계조도 값에 대한 상대 오차이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광 패턴 인식을 위하여 고속성과 병렬성의 장점을 갖는 광상관기 구조와 프로그램에 의한 제어 특성을 갖는 디지털 처리 방식의 특징을 도입하여 광 패턴 인식을 하였다.

입력 이미지는 out-of-plane 상에서 회전된 5개의 이미지를 32×32의 이진 데이터로 처리하여 사용하였고, 기준 이미지는 입력 이미지를 중첩시켜 구하는 pSDF 공간 불변 필터 방식으로 구현하였으며, 광 상관기로는 이진 결합 변환 상관기를 이용하였다.

공간 광 변조기로 사용된 액정 표시 소자의 광 변조 특성을 실험하여 이진 변조 특성을 갖고

있음을 확인하였고, 액정 표시 소자의 격자 구조에 의한 회절 패턴과 기준 이미지와 입력 이미지에 의한 상관 패턴을 분리하기 위하여 렌즈 조합을 이용하였다.

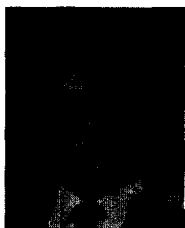
상관 특성에 대한 시뮬레이션 결과, 동일 클래스 인식인 경우, 이진 결합 변환 상관기가 결합 변환 상관기보다 상관 침두치 세기에서  $9.55 \times 10^3$ 배, 상관 침두치 세기대 부로브비는 2.84배, 신호대 잡음비는 1.70배, 상관폭은 14.5배 향상되었다.

이진 결합 변환 상관기를 이용하여 광학적 상관기를 구현하여 실험한 결과, 동일 클래스 인식인 경우에는 4.1~9.6%의 오차 범위 내에서 상관 침두치 세기가 일정하게 나타났다.

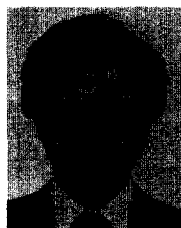
參 考 文 獻

1. A. Vander Lugt, "Single Detection by Complex Spatial Filtering", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-10, pp. 139, 1964.
2. D. Casasent, "Optical Data Processing", Springer-Veriag, Berlin Heidelberg, pp. 12~13, 1978.
3. B. Javidi, "Comparison of Binary Joint Transform Correlators and Phase-Only Matched Filter Correlator", Opt. Eng., vol. 28, no. 3, pp. 267~272, 1989.

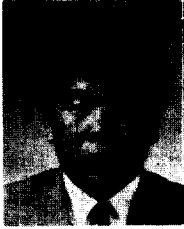
4. F. T. S. Yu, S. Jutamulia and D. A. Gregory, "Adaptive Real-Time Pattern Recognition using A Liquid Crystal TV based Joint Transform Correlator", Appl. Opt., vol. 26, no. 8, pp. 1,370~1,372, 1987.
5. B. Javidi and J. L. Horner, "Single Spatial Light Modulator Joint Transform correlator", Appl. Opt., vol. 28, no. 5, pp. 1,027~1,032, 1989.
6. B. Javidi and S. F. Odeh, "Multiple Object Identification by Bipolar Joint Transform Correlation", Opt. Eng., vol. 27, no. 4, pp. 295~300, 1988.
7. F. T. S. Yu, F. Cheng and D. A. Gregory, "Effects of Fringe Binarization of Multiobject Joint Transform Correlation", Appl. Opt., vol 28, no, 15, pp. 2,988~2,990, 1989.
8. D. Casasent, "Unified Synthetic Discriminant Function Computational Formulation", Appl. Opt., vol. 23, no. 10, pp. 1,620~1,627, 1984.
9. B. Javidi, "Synthetic Discriminant Function- based nonlinear Optical Correlator", Appl. Opt., vol. 28, no. 13, pp. 2,490~2,495, 1989.
10. 전석희, "공간 광 변조기와 CGH를 이용한 광 패턴 인식 시스템에 관한 연구", 연세대학교, 박사학위논문, 1990.
11. 김준욱, "회전 변이 측정을 위한 광 패턴 인식에 관한 연구", 연세대학교, 석사 학위 논문, 1990.
12. 최중식, "CGH를 이용한 회전 불변 광 패턴 인식에 관한 연구", 연세대학교, 석사학위논문, 1990.



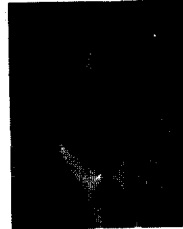
鄭 倉 圭 (Chang Kyo JUNG) 正會員  
 1965年 6月 22日生  
 1988年 2月 : 延世大學校 電子工學科 卒業 (工學士)  
 1990年 8月 : 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業 (工學碩士)  
 現在 : 延世大學校 大學院 電子工學科 研究助教



金 南 秀 (Nam Soo KIM) 正會員  
 1957年 10月 16日生  
 1981年 2月 : 光云大學校 電子工學科 卒業 (工學士)  
 1983年 2月 : 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業 (工學碩士)  
 現在 : 延世大學校 大學院 電子工學科 博士課程  
 韓國電子通信 研究所 移動通信室 先任研究員



趙 東 來(Dong Rae CHO) 正會員  
1950年 9月23日生  
1973年 2月：延世大學教 電子工學科 卒業(工學士)  
1979年 2月：延世大學教 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)  
現在：延世大學校 大學院 電子工學科 博士課程  
國防科學 研究所 研究室長



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 파리 6 대학(ph.D)  
1976年～現在：延世大學校 電子工學科 教授