

論文96-33A-6-22

# 파워스펙트럼의 Log-polar 좌표변환 및 NJTC를 이용한 광 물체 인식 시스템

(An Optical Object Recognition System using Log-polar  
Coordinate Transform of Power Spectrum and NJTC)

李相二\*, 蔡滌秉\*\*, 李丞玄\*, 金恩洙\*

(Sang-Yi Yi, Ho-Byoung Chae, Seung-Hyun Lee, and Eun-Soo Kim)

## 요 약

본 논문에서는 회전, 크기, 이동에 불변한 특성을 지니는 새로운 광 디지털 하이브리드 물체인식 시스템을 제안하였다. 이동불변 특성을 얻기 위하여 푸리에 파워스펙트럼을 이용하였으며, log-polar 좌표 변환을 통하여 회전과 크기불변 특성을 얻었다. 그리고 유사도 판정은 위상과 진폭신호 비중 조절이 가능한 NJTC(nonlinear joint transform correlator)를 이용하여 수행되었다. 실험을 통해 본 논문에서 제안된 시스템의 효용성을 검토하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a new Opto-Digital hybrid object recognition system which has rotation, scale, and shift invariant characteristics. The Fourier power spectrum of the object image is modified to get shift invariance. The log-polar transform is used for rotation and scale invariance. And the decision of similarities is performed by nonlinear joint transform correlator(NJTC) that can control the ratio of phase and amplitude signals. Experimental verification of the proposed optical object recognition system is presented.

## 1. 서 론

자연 환경에서 임의의 형태로 주어지는 물체 영상을 적응적이며 실시간적으로 인식하는 기술은 로봇 시각, 자동 감시 장치, 자동 표적 인식 등의 응용 분야에서 핵심 기술로서 활발히 연구되고 있다. 일반적으로 물체 인식이란 규격화된 영상이 아닌 자연 현상에서 입력된 불규칙한 정보로부터 인간과 같이 필요한 영상을 자연스럽게 인식하는 것이다. 입력 정보의 불규칙성

은 자연계에서 발생하는 외부 잡음 외에도 물체의 위치 이동 및 회전과 같은 상태 변화 그리고 관측 거리에 따른 크기 변화에 따라 개별적 혹은 복합적으로 발생하게 된다.

따라서 자연계에서 다양한 형태로 입력되는 물체 영상을 효과적으로 인식하려면, 물체의 위치, 회전, 크기 변화 등에 관계없이 인식할 수 있는 왜곡 불변 특징(feature)의 추출이 요구된다. 이러한 왜곡 불변 특징은 동일한 영상 변화에 대해 인식 특성이 같고, 서로 다른 영상 변화에 대해서는 분리 식별이 용이해야 한다.

일반적으로 푸리에 변환된 입력 영상의 파워 스펙트럼은 입력 영상 신호의 위치 정보를 포함하고 있는 위상 성분이 제거된 상태에서 나타나므로 이동 불변 특성을 나타내게 된다. 위치 이동에 불변한 파워 스펙트럼은 주파수 영역의 중심점을 기준으로 패턴이 변화하

\* 正會員, \*\* 準會員, 光云大學校 電子工學部

(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

※ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 (#01E0663) 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1996年1月5日, 수정완료일: 1996年5月17日

게 되는데, 입력이 회전하면 스펙트럼도 회전하고, 크기가 변하면 스펙트럼의 크기도 변하게 된다. 결과적으로 파워 스펙트럼을 이용하게 되면 영상의 위치, 회전 및 크기 변화의 중심점을 얻을 수 있으며 또한 영상 전체의 형태가 아니라 영상을 구성하는 특정한 패턴(원, 직선, 타원 등)에서 발생하는 주파수를 대상으로 패턴을 형성함으로써 단순한 화소 정합에 비하여 잡음에 강한 특성을 지니게 된다.

회전 및 크기 불변 특성은 CHF(circular harmonic filter)<sup>[11]</sup>와 Mellin 변환<sup>[12]</sup>에서 각각을 얻을 수 있으며, 이러한 불변 알고리즘들은 주파수 영역에서 형성되는 고조파 성분을 이용하기 때문에 입력 영상 신호의 푸리에 변환이 필수적이다. 한편 회전 및 크기 불변 특성을 동시에 갖고 있는 알고리즘으로 log-polar 좌표 변환 방법이 있는데,<sup>[13]</sup> log-polar 좌표 변환은 푸리에 변환 없이 단순히 영상의 좌표계만을 변환하는 방법으로 시스템 구현시 수학적 연산처리가 아니라 메모리 대응(memory mapping) 방법을 이용할 수 있으므로 고속처리가 가능하다. 그러나 log-polar 좌표 변환 방법은 모든 입력 영상에 대해 변환이 시작되는 중심점을 검출해야 하는 제약점이 있어 전처리 과정을 요구하게 된다.

따라서 본 논문에서는 위치, 회전, 크기 변화에 대한 불변 특성을 얻기 위하여 푸리에 파워 스펙트럼을 이용하여 이동 불변 특성을 얻음과 동시에 회전과 크기 변화에 무관한 변환의 중심점을 얻어 log-polar 좌표 변환을 적용하고자 한다.

최종적으로 물체 인식 시스템을 구성하기 위해서는 기준 영상에 대하여 추출된 왜곡 불변 영상의 유사도를 측정하게 된다. 일반적으로 두 신호간의 유사도 측정은 실시간 처리를 위해 광 상관기를 이용하게 되는데, 복소 공간정합필터를 이용한 VanderLugt 광 상관기와 파워 스펙트럼을 이용하는 광 JTC(joint transform correlator)등이 있다<sup>[14]</sup>. 특히 JTC는 별도의 복소 정합필터 없이 실수 함수인 파워 스펙트럼을 이용하여 시스템 구성이 가능하여 실시간 광 상관 시스템으로 각광을 받고 있다. 최근에는 JTC에서 이진 위상을 추출하여 위상상관을 시키는 광 BPEJTC(binary phase extraction JTC)<sup>[15]</sup>가 제안되어 보다 큰 peak-to-sidelobe 비율과 최적의 상관 판별력을 실시간으로 얻을 수 있게 되었으며 보다 최근에는 광 BPEJTC를 일반화한 시그모이드(sigmoid) 함수를 이용한 NJTC(nonlinear JTC)<sup>[16]</sup>가 구성되어 위상과 진폭

에 따른 상관 판별력을 조절할 수 있게 되었다.

따라서 본 논문에서는 로보트 시각의 새로운 접근 방식으로 먼저 입력 영상신호의 이동 불변 특징 및 신호변화의 중심점을 얻기 위하여 광학적으로 푸리에 파워 스펙트럼을 얻고, 회전 및 크기 불변 특성을 얻기 위하여 log-polar 좌표변환을 메모리 대응 방법으로 고속처리하게 된다. 이상의 과정을 통해 추출된 위치, 회전 및 크기 변화에 대한 왜곡 불변 신호는 최종적으로 실시간 상관기인 NJTC에 입력시켜 기준신호에 대한 유사도를 측정함으로써 입력된 물체 영상의 왜곡에 관계없이 실시간으로 인식할 수 있는 새로운 광 물체 인식 시스템을 제시하였다. 광시스템은 상용 LCD와 CCD 카메라를 입력력 장치를 이용하고 컴퓨터와 영상 처리기를 디지털 시스템으로 이용하여 구현하였으며, 인간이 연속적으로 처리되고 있다고 느낄 수 있는 비디오 프레임으로 처리하는데 목적을 두고 있다. 제안한 왜곡 불변 인식 시스템의 효용성을 검증하기 위한 실험으로 IC 칩 및 IC 유사물을 대상으로 실험결과를 제시하였다.

## II. Log-polar 좌표변환에 의한 왜곡 불변 신호 검출

본 논문에서는 입력 물체 영상에 대한 왜곡 불변 특성을 실시간으로 얻고, 인식하기 위한 새로운 접근방법으로 2차원 광 영상처리 및 디지털 영상처리 알고리즘을 상호보완적으로 이용하고자 한다. 2차원 광 영상처리 기술은 기존의 디지털 컴퓨터에서 수행하는 화소대 화소 처리 개념을 영상 대 영상처리 개념으로 확장시켜 처리함으로써 기존에 해결하기 어려웠던 실시간 병렬처리에 대한 문제의 해결이 가능하게 된다.

일반적으로 임의의 함수  $r(x, y)$ 의 이동 불변 특성을 위치 변화된 함수  $r(x - x_0, y - y_0)$ 를 푸리에 변환하여 얻은  $R(u, v)$ 를 파워 스펙트럼  $E(u, v)$ 로 변환하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R(u, v) &= R_0 \iint r(x - x_0, y - y_0) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \\ &= |R(u, v)| \exp[j\phi_r(u, v)] \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$E(u, v) = R(u, v) R^*(u, v) = |R(u, v)|^2 \quad (2)$$

여기서  $(x, y)$ 는 2차원 공간좌표를  $(u, v)$ 는 공간주파수 좌표를 각각 나타내며, \*는 복소공액을 나타낸다. 식(1)

에서  $|R(u, v)|$ 는  $R(u, v)$ 의 진폭을 나타내며, 첫 번째 지수항은 영상의 형태를 구성하는 위상 성분 그리고 두 번째 지수항은 영상이 존재하는 위치를 나타낸다. 식(1)에 공액복소수를 곱하는 것으로 구성되는 식(2)의 파워 스펙트럼은 영상을 구성하기 위하여 가장 중요한 신호인 위상 성분이 제거된 상태에서 진폭 정보만이 존재하고 있다. 따라서 식(2)를 역푸리에 변환하여 원 영상을 회복할 수는 없다. 그러나 위상신호의 제거는 영상의 형태 외에도 영상이 존재하는 위치를 나타내는 정보를 동시에 제거하므로 이동 불변 특성이 나타나게 된다. 이와 같이 위치정보가 사라지면 모든 신호가 공간주파수 평면의 중심점인 DC를 기준으로 원점대칭 분포를 이루며 나타난다. 따라서 입력 신호에 변화가 발생하면 파워 스펙트럼 역시 특성이 변하게 되는데, 이때 입력 영상이 변화하고 있는 위치에 관계없이 파워 스펙트럼은 DC를 중심으로 하여 변화가 발생한다. 이러한 파워 스펙트럼에 나타난 신호의 형태는 영상 전체의 형태가 아니라 영상을 구성하는 특정한 패턴(원, 직선, 타원 등)의 상태를 나타내게 된다.

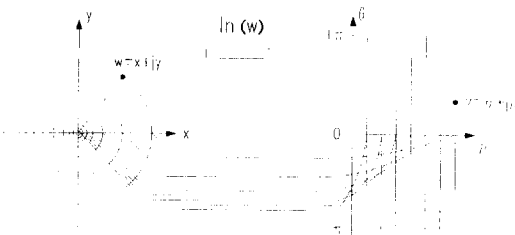


그림 1. Log-polar 좌표 변환을 위한 메모리 대응  
Fig. 1. Memory mapping for log-polar coordinate transformation.

회전 및 크기 변화에 불변하게 영상을 인식할 수 있는 좌표변환 방법을 살펴보기 위하여 주파수 평면에서 검출된 파워 스펙트럼인  $E(u, v)$ 이 존재하는 평면을 그림 1과 같이 실수축  $x$ 와 허수축  $y$ 를 갖는 복소평면으로 가정하고 대응하는 log-polar 좌표변환 평면을 실수축  $\theta$ 와 허수축  $\rho$ 를 갖는 복소평면을 가정하자. 그러면  $x$ - $y$  평면상의 한 점인  $w$ 는 식(3)에 의하여 또 다른 좌표평면의 한 점  $z$ 로 변환될 수 있다<sup>[31]</sup>.

$$w = e^z \tag{3}$$

여기서  $z$ 는 복소평면상의 한 점으로  $z = \rho + j\theta$  로 주어진다.

$$e^{\rho + j\theta} = e^\rho e^{j\theta} = e^\rho [ \cos(\theta) + j\sin(\theta) ] \tag{4}$$

$$x + jy = e^{\rho + j\theta} = e^\rho \cos(\theta) + je^\rho \sin(\theta) \tag{5}$$

$x$ - $y$  영상평면에서 반경  $l$ 은 식(6)으로서 나타낼 수 있다.

$$l = |w| = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{6}$$

따라서 식(5)를 이용하여 식(6)을 다시 정리하면 식(7)과 같이 주어진다.

$$l = \sqrt{ [ e^\rho \cos(\theta) ]^2 + [ e^\rho \sin(\theta) ]^2 } = e^\rho \tag{7}$$

$$\rho = \ln(l) \tag{8}$$

유사한 방법으로  $x$ - $y$  영상평면 내의 화소 위치에 대한 각도는 식(9)와 식(10)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\arg(w) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan\left[ \frac{e^\rho \sin(\theta)}{e^\rho \cos(\theta)} \right] = \theta \tag{9}$$

따라서  $x$ - $y$  영상평면 내의 화소들에 log 변환을 취하면, 식(10)으로 설정이 가능하다.

$$\ln(x + jy) = \ln[ e^{\rho + j\theta} ] = \ln(l) + j\theta = \rho + j\theta \tag{10}$$

물체 영상의 크기가  $a$ 배만큼 변화된 경우 log-polar 좌표변환을 취하게 되면,  $u = \ln(al) = \ln(a) + \ln(l)$ 에 의하여  $\rho$ 축 방향으로의 이동만이 나타난다. 또한 영상이 회전한 경우는  $r$  성분에 무관하게  $\theta$  성분에 대해서만 변화가 발생하게 된다.

결과적으로 입력 영상  $r(x - x_0, y - y_0)$ 의 크기가 변하고 회전이 발생하더라도 파워 스펙트럼  $E(u, v)$ 를 그림 1에 따라 log-polar 좌표변환을 이용하면, 크기 변화량은  $\ln(l)$  성분 그리고 회전량은  $\theta$  성분에 의하여 이동 성분으로 변화되어 나타난다. 특히 log-polar 좌표변환을 위하여 주어진 입력이 파워 스펙트럼임을 고려하면, 위치 불변 특성이 함께 나타남을 알 수 있다. 이러한 변환결과는 광학적인 방법에 의해서도 얻을 수도 있으나<sup>[7]</sup>, 그 변환 관계가 좌표계의 변환으로 별도의 계산 없이 디지털적으로 단순한 메모리 대응에 의하여 처리가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 그림 1에 따라 좌표계 대응관계를 메모리에 저장하고 입력되는 파워 스펙트럼을 log-polar 좌표변환하여 고속처리 알고리즘 없이도 실시간 처리가 가능하도록 하였다.

그러나 수학적으로 입력 영상의 모든 점은 좌표변환된 영역에 정확히 일대일 대응될지라도 실제 디지털 시스템은 표현 영역이 유한하다. 따라서 일정한 영역에

존재하는 유한한 수의 화소와 유한한 밝기를 이용하여 좌표변환된 영상을 표현해야 한다. 특히 표현 영역의 양자화는 그림 1의 화소 대응관계에서 하나의  $w$ 가 여러 개의  $z$ 에 대응하는 일대다 대응관계를 발생시킬 수 있다. 또는  $w$ 가 존재하지 않는  $z$ 를 발생시킬 수도 있다. 따라서  $x$ - $y$  영상평면 내 하나의 화소는 좌표변환된 공간의 단일 화소가 아닌 화소들의 영역에 대응하게 되는 것이다. 즉 그림 1에서 좌표변환평면의 공간좌표  $(\rho, \theta)$ 를 갖는 화소에 대하여  $\rho$ 는  $x$ - $y$  영상평면상에서  $\ln\sqrt{x^2+y^2}$ 에서  $\ln\sqrt{(x+\alpha)^2+(y+\beta)^2}$ 까지 걸쳐 있으며,  $\theta$  좌표는  $\arctan[y/(x+\alpha)]$ 에서  $\arctan[(y+\beta)/x]$ 에 걸쳐 있게 된다. 이때  $\alpha$ 와  $\beta$ 는  $\rho$ - $\theta$  공간좌표의 위치를 양자화하였을 때 한 점에 대응하는  $x$ - $y$  영상평면의 면적을 구성하는 길이 변수이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 크기는 변환의 중심( $\rho=0$ )에 가까운 점일수록 값이 작게 되며, 중심에서 먼 점에서는 매우 큰 값을 지닌다. 이러한 이유에서  $x$ - $y$  평면에 존재하는 화소는 중심에 보다 가까운 화소가 보다 먼 화소에 비하여 대응 영역이 보다 크게 분포하게 되는데 이것은 인간의 시각계가 보다 가까운 물체를 보다 세밀히 보려는 것과 같은 것이다.

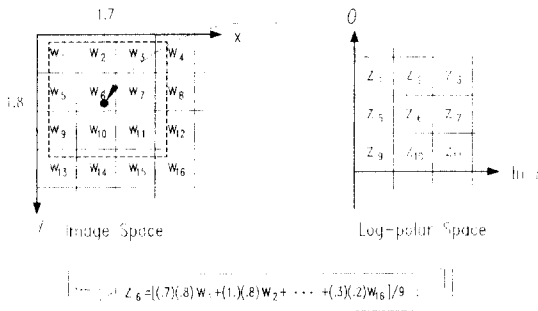


그림 2. Log-polar 좌표변환 오차를 보정하기 위한 보간법  
 Fig. 2. Interpolation method used for the error correction of log-polar coordinate transformation.

따라서 본 논문에서는 영상의 각 화소가 대응하는 변환 영역 내의 범위를 계산하고 이 범위에 대응하는 각 화소의 밝기 정보를 위치시키는 방법을 도입하였다<sup>[8]</sup>. 즉 좌표변환된 영역 내 각각의 화소에 상응하는 영상의 한 지점이 정의되고, 이 정의된 점 주변 화소들의 밝기를 이용한 보간법을 사용하게 된다. 이 방법은 역변환으로 찾아낸 지점에서 중심에 위치한 3×3 화소로 둘러싸인 영상 부분의 화소 밝기를 단순히 더하는

것으로 이루어지는 것으로 그림 2와 같이 수행된다. 먼저 변환될 log-polar 좌표 평면의  $z_6$ 를 결정하게 될 영상 평면의 위치를 계산한다. 그리고 해당하는 점을 중심으로 3×3 화소에 해당하는 영역을 취한 후 각 화소에 가중치를 곱하고 평균을 함으로써  $z_6$ 의 값을 결정한다. 이때 화소 가중치는 하나의 화소를  $n \times n$ 으로 분할하여, 영역에 포함된 양으로 결정하게 되며,  $n$ 의 값이 커질수록 정밀도는 증가하게 되나, 지나치게 큰 값은 계산량을 증가시키게 된다. 이상의 방법을 이용하여 변환될 모든 영역에 할당된 비중을 정리하게 되면, 변환 관계가 명확히 정리됨으로써 하드웨어적으로 구현이 용이하게 된다.

### III. 시그모이드 함수를 이용한 광 NJTC

파워 스펙트럼을 log-polar 좌표변환하여 얻은 신호는 시스템 특성상 회전 및 크기 변화에 대한 성분이  $\rho$ 와  $\theta$ 축을 따라 주기적인 이동 성분으로 나타나게 되므로 변환된 영상이 존재하는 부분만을 영역화하여 원 영상과 유사도를 판별하게 된다. 유사도 판별과 영상이 존재하는 위치 판별은 광 상관기에 의해서 수행되며, 추출된 왜곡 불변 특징신호가 광 상관기의 입력으로 이용된다<sup>[9]</sup>.

최근에는 JTC의 입출력 장치를 고해상도의 LCD 공간 광 변조기(SLM: spatial light modulator)와 CCD 카메라를 이용하여 구성하여 비디오 프레임으로 상관 결과를 얻을 수 있게 되었다.<sup>[5,10]</sup> 그러나 JTPS(joint transform power spectrum)를 이용하는 기존의 JTC는 필요한 상관신호 외에도 강한 DC와 함께 불필요한 상관이 발생한다. 그리고 파워 스펙트럼을 이용하는 특성상 위상과 진폭성분이 상관에 미치는 영향을 효과적으로 처리할 수 없었다. 즉 상관에 있어서 진폭성분은 peak to-sidelobe의 비율을 낮추게 되므로 위상신호를 강조할 필요가 있으나, 위상신호가 지나치게 강조되면 다중 표적 영상에서 상관오류 및 상관유실을 발생시키는 단점을 나타내게 된다.<sup>[11]</sup>

그럼에도 불구하고 로보트 시각과 같이 정밀하면서도 실시간 처리가 요구되는 물체 인식 분야에는 JTC와 같이 실시간 상관이 필수적이다. 따라서 JTC에서 DC 및 불필요한 상관신호를 제거하고 위상과 진폭특성을 조절하며 상관을 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 상관기를 구성하는 것은 매우 중요하다.

최근에 JTC에서 DC 및 불필요한 상관신호를 제거하고 위상과 진폭의 가중치를 조절할 수 있는 시그모이드 함수로 비선형 특성을 부여한 새로운 NJTC가 제안되었다<sup>16)</sup>. NJTC는 그림 3과 같이 광디지털 하이브리드 형태로 구현이 가능한 모델로 위상과 진폭의 비중을 조절하며 2차원 병렬처리가 가능하여 SLM내에 존재하는 화소수에 영향을 적게 받으며 고속 처리가 가능하다.

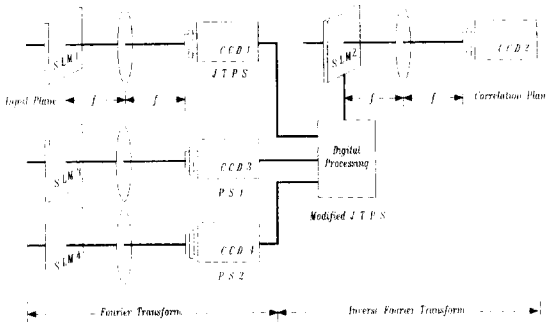


그림 3. 실시간 상관을 위한 광 NJTC 시스템 구성도  
Fig. 3. Optical NJTC system setup for real-time correlation.

그림 3에서 SLM1에 입력을 나타내고 CCD1으로 파워 스펙트럼을 검출한 이후 다시 SLM2에 나타내면 CCD2에 상관결과가 나타나는데 이것이 기존의 JTC를 실시간으로 동작시키는 방법이다. NJTC는 여기에 두 개의 공간 광 변조기(SLM3, SLM4)와 CCD 광검출기(CCD3, CCD4)를 추가하고 디지털 시스템을 보강하는 것으로 이루어진다. 디지털 시스템은 JTPS에서 상호간섭에 필요한 성분만을 추출할 수 있도록 JTPS를 재구성하고 위상과 진폭신호의 비중을 자유로이 조절할 수 있도록 한다. 특히 전체 시스템 구성을 살펴보면 동일한 시스템이 4번 사용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 하나의 시스템을 구성하고 입출력만을 변동시키며 시분할 방법으로 처리하면 효과적인 구성이 가능하다.

이와 같이 구성되는 NJTC를 해석하기 위하여, 기존 광 JTC의 입력평면(SLM1)을 상하단으로 분리하고 하단평면에 기준 영상의 불변패턴  $r(x,y)$ 를 식(11a)와 같이 이동시켜 위치시키고, 상단평면에  $n$ 개의 다중 표적으로 구성된 입력 영상의 불변패턴을 식(11b)와 같이 구성하여 푸리에 입력평면을 구성하였다.

$$r(x, y) = r(x - x_0, y - y_0) \quad (11a)$$

$$s(x, y) = \sum_{i=1}^n s_i(x - x_i, y - y_i) \quad (11b)$$

기준 영상의 불변패턴과 입력 영상의 불변패턴의 상관도를 측정하기 위하여, 식(11a)와 식(11b)를 동시에 푸리에 변환하여 CCD1으로 JTPS를 검출하면 식(12)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} E(u, v) = & |R(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n |S_i(u, v)|^2 \\ & + \sum_{i=1}^n R(u, v)S_i^*(u, v) \exp\{-j[(x_0 - x_i)u + (y_0 - y_i)v]\} \\ & + \sum_{i=1}^n R^*(u, v)S_i(u, v) \exp\{j[(x_0 - x_i)u + (y_0 - y_i)v]\} \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n S_i(u, v)S_k^*(u, v) \exp\{-j[(x_i - x_k)u + (y_i - y_k)v]\} \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n S_i^*(u, v)S_k(u, v) \exp\{j[(x_i - x_k)u + (y_i - y_k)v]\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $R(u, v)$ 와  $S_i(u, v)$ 는  $r(x, y)$ 와  $s_i(x, y)$  각각의 푸리에 변환을 나타낸다. 식(12)의 JTPS에는 입력 영상과 기준 영상의 간섭 성분인 두 번째와 세 번째 항 외에도 불필요한 간섭항들이 포함되어 있음을 볼 수 있다. 처음 두 항은 역푸리에 변환에 의하여 자기상관 신호로 발생하며, 다섯 번째와 여섯 번째 항의 간섭 신호는 기준표적에 무관한 상호상관 성분들을 나타낸다. 그런데 식(12)에서 자기상관과 동일 평면에 의한 상호상관은 선형적으로 합성되어 있으므로 기준 영상과 입력 영상 각각의 파워 스펙트럼을 구하여 식(12)에서 감산하면 자기상관 신호와 입력 평면 내의 영상 간에 발생하는 상호상관 신호를 제거할 수 있다. 이를 위하여 기준 영상과 입력 영상을 SLM3와 SLM4에 나타내고 CCD3과 CCD4로서 파워 스펙트럼을 검출하여 디지털 시스템에서 감산을 수행한다. 이를 이용하여 새로운 JTPS를 구할 수 있으며 식(13)으로 주어지게 된다.

$$\begin{aligned} E_{NEW}(u, v) = & \sum_{i=1}^n R(u, v)S_i^*(u, v) \exp\{-j[(x_0 - x_i)u + (y_0 - y_i)v]\} \\ & + \sum_{i=1}^n R^*(u, v)S_i(u, v) \exp\{j[(x_0 - x_i)u + (y_0 - y_i)v]\} \\ = & 2 \sum_{i=1}^n |R(u, v)||S_i(u, v)| \\ & \times \cos\{\phi_r(u, v) - \phi_{s_i}(u, v) - (x_0 - x_i)u - (y_0 - y_i)v\} \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)은 순수하게 기준 영상과 입력 영상간의 상호상관 신호만으로 구성되어 있으나, 서로간의 상관결과와 진폭신호의 영향을 받아 낮은 peak-to-sidelobe 비율을 나타낸다. 따라서 식(13)에 위상과 진폭신호를 조

절하며 상관결과를 나타내도록 하기 위하여, 식(14)에 의하여 주어지는 비선형 함수를 적용한다.

$$\text{if } E_{NEW}(u, v) \geq 0 \quad (14a)$$

$$E_{NJTC}(u, v) = 2 \sum_{i=1}^n \{ |R(u, v)| S_i(u, v) \}^p \times |\cos(\phi_r(u, v) - \phi_s(u, v) - (x_0 - x_i)u - (y_0 - y_i)v)|^p$$

$$\text{if } E_{NEW}(u, v) < 0 \quad (14b)$$

$$E_{NJTC}(u, v) = -2 \sum_{i=1}^n \{ |R(u, v)| S_i(u, v) \}^p \times |\cos(\phi_r(u, v) - \phi_s(u, v) - (x_0 - x_i)u - (y_0 - y_i)v)|^p$$

식(14)를 보다 간단히 표현하면 식(15)로써 표현이 가능하다.

$$E_{NJTC}(u, v) = 2 |E_{NEW}(u, v)|^p \text{sgn}\{E_{NEW}(u, v)\} \quad (15)$$

여기서 연산자  $\text{sgn}[\bullet]$  는 시그넘(signum) 함수를 나타내며,  $p$ 는 NJTC의 특성을 결정하는 매개변수로 ( $0.0 \leq p \leq 1.0$ )의 범위에서 실수값으로 결정된다.

식(15)에 의하여 구성되는 신호 각각의 고조파의 외곽 형태는 입력과 기준신호의 푸리에 변환 진폭의  $p$  제곱에 비례하므로,  $p=1.0$ 의 경우는 선형적 출력 결과를 나타낸다.  $p=1.0$ 으로 설정하여 원래의 신호를 변화 없이 유지하면 peak-to-sidelobe 비율이 낮아져 잡음 환경에 적용이 어렵게 된다. 반면에  $p=0.0$ 인 경우에는 완전 위상형태의 상관기로 작용하여 진폭신호에 무관하게 위상 신호만으로 상관이 이루어져 높은 peak-to-sidelobe 비율과 높은 상관 판별력을 나타낸다. 그러나 위상함수만 구성하면 다중 표적 영상의 위치에 따라 상관 오류 및 상관 유실을 발생시킬 수 있는데 이것은 진폭함수의 보상을 통해서 해결될 수 있다<sup>[12]</sup>.

따라서 상관 오류 및 상관 유실을 방지하고 상관 판별력을 높이기 위해서는 위상신호를 최대한 이용하면서 진폭을 보상해야 한다. 이것은  $p$ 값을 점차 낮은 값으로 변화시키며 위상과 진폭신호 가중치 비율을 조절하며 최적의 경우를 설정해야 한다.  $p$ 값이 작아지면 위상신호가 강조되고  $p$ 값이 커지면 상대적으로 진폭이 강조된다. 시그모이드 함수를 이용한 NJTC 시스템을 효과적으로 이용하기 위해서는 입력 영상이 단일 영상 혹은 비주기적인 경우에는  $p$ 값을 작게 설정하고, 주기적으로 위치한 다중 표적이 입력되면  $p$ 값을 크게 설정함으로써 효과적인 상관 시스템을 구성할 수 있다.

#### IV. 시스템 구성 및 실험

본 논문에서 새로이 제시된 로봇트 시각을 위한 실시간 물체 인식 시스템은 그림 4와 같이 광디지탈 하이브리드 시스템으로 구성하였다. 시스템은 Laser1으로 구성된 푸리에 파워 스펙트럼 검출부, Laser2로 구성된 NJTC의 JTPS 검출부, Laser3를 이용하는 상관 출력부로 구성된다. 물체 입력 장치 및 광검출기 소자로는 CCD 카메라를 이용하였으며, 영상 디스플레이 장치는 LCD를 이용하였다. 그리고 NJTC의 JTPS를 얻기 위하여 빔분할기(BS)와 2개의 영상차단막(stopper)을 사용하였다.

시스템 동작은 먼저 CCD 카메라에 포착된 물체 영상이 LCD1에 나타나면 CCD1에 의해 영상의 푸리에 파워 스펙트럼이 검출된 후 디지털 시스템에서 log-polar 좌표변환되어 NJTC로 전송된다. NJTC 시스템은 LCD2를 상하단으로 분리하여 기준 영상의 log-polar 좌표변환된 영상을 하단에 나타내고, 상단에 입력 영상의 log-polar 좌표변환된 영상을 나타낸다. 그러면 CCD2, CCD3, CCD4를 통하여 상단 영상의 파워 스펙트럼과 JTPS 그리고 하단 영상의 파워 스펙트럼이 검출된다. 디지털 시스템에서는 log-polar 좌표변환과 각 영상의 파워 스펙트럼인 PS1과 PS2의 부호를 반전시켜 JTPS에 더하고, 비교기를 이용하여 이진 위상을 추출하고 D/A 변환하여 LCD3에 디스플레이하게 된다. 그러면 CCD5에서 상관결과를 얻을 수 있다.

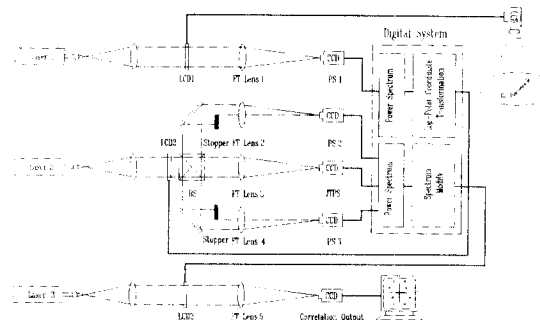


그림 4. 지능형 로봇트 시각을 위한 물체인식 시스템의 구성도

Fig. 4. Block diagram of the object recognition system for intelligent robot vision.

시스템 구성은 공간 광 변조기로 Epson Video Projector에 내장된 TFT-LCD(thin-film-transistor LCD, 화소수: 320×220, 광 투과 면적: 63×57μm)를 이

용하였으며, He-Ne 레이저(35mW)를 광원으로 이용하였다. CCD 카메라와 광 검출기는 금성하니웰 GC-103E 비디오 카메라(영상화소 510×492)를 이용하였다. 푸리에 변환은 사용된 LCD에서 충분한 회절을 얻을 수 있는 초점거리 1m의 푸리에 변환렌즈를 이용하였다. 시스템 구성에서 렌즈의 초점거리는 시스템 크기에 가장 큰 영향을 좌우하는 요소가 된다. 보다 작은 규모로 시스템을 구성하기 위해서는 렌즈의 초점거리가 짧아져야 하는데 이것은 LCD의 해상도에 관련된다. 그림 4에서 회전, 크기 및 이동에 불변한 특징은 물체 영상의 푸리에 파워 스펙트럼 중심점을 중심으로 log-polar 좌표변환함으로써 얻을 수 있게 되는데, 이러한 특성을 분석하기 위하여 그림 5에 나타난 영상을 기준 영상으로 사용하였다.

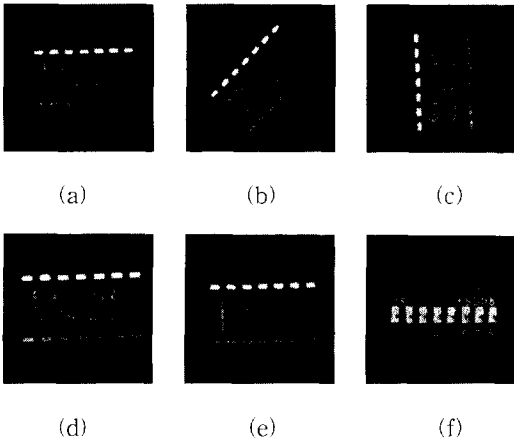


그림 5. 인식을 위하여 사용된 테스트 영상  
 (a) 기준 영상(금성 74LS93) (b) 45° 회전된 기준 영상 (c) 90° 회전된 기준 영상 (d) 120% 확대된 기준 영상 (e) 유사 영상(시그네틱스 74LS73) (f) 이종 영상(DIP 스위치)

Fig. 5. Test images for recognition.  
 (a) Reference image (GS 74LS93) (b) 45° rotated image (c) 90° rotated image(d) 120% scaled image (e) Similar image(Signetics 74LS73) (f) Different image(DIP switch)

그림 5에서 (a)는 기준 영상으로 사용된 IC 칩으로 금성 74LS93이며, (b)는 기준 영상이 반시계 방향으로 45° 회전한 것이며, (c)는 90° 회전한 영상이다. 그림 5(d)는 120% 확대된 기준 영상을 나타낸다. 그림 5(e)는 기준 영상과 IC 칩의 외형은 같지만 기록된 문자가 다른 이종 영상으로 시그네틱스의 IC 칩인 74LS73이며, (f)

는 외형 자체가 다른 DIP 스위치를 나타낸 것이다. 그림 5에 주어진 테스트 영상들은 CCD 카메라를 이용하여 검출하였으며, 정확한 성능 평가를 위하여 기준 영상을 영상처리 방법에 의하여 회전 및 크기 변화를 시켰다.

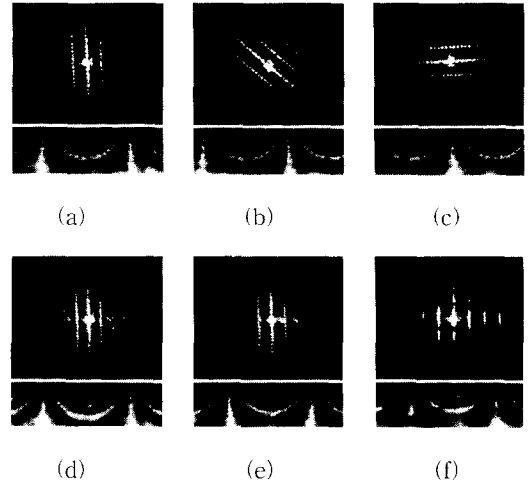


그림 6. 테스트 영상에 대한 파워 스펙트럼 및 log-polar 좌표변환된 패턴  
 (a) 기준 영상(금성 74LS93) (b) 45° 회전된 기준 영상 (c) 90° 회전된 기준 영상(d) 120% 확대된 기준 영상 (e) 유사 영상(시그네틱스 74LS73) (f) 이종 영상(DIP 스위치)

Fig. 6. Power spectra and log-polar coordinate transformed patterns for input image.  
 (a) Reference image (GS 74LS93) (b) 45° rotated image (c) 90° rotated image(d) 120% scaled image (e) Similar image(Signetics 74LS73)(f) Different image(DIP switch)

그림 6은 그림 5의 테스트 영상을 공간 광 변조기에 나타내고 초점거리 1m의 푸리에 변환 렌즈로 푸리에 변환하며 광검출기로 검출한 파워 스펙트럼과 디지털적으로 log-polar 좌표변환한 결과를 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 파워 스펙트럼을 기준으로 할 때 (b)의 파워 스펙트럼은 (a)가 일정한 방향으로 회전하여 나타난 형태이고, (c)는 90° 회전한 것을 알 수 있다. 이것은 그림 5와 관련하여 파워 스펙트럼의 변화를 살펴보면 영상이 회전하면, 파워 스펙트럼 역시 회전하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 입력평면에서 영상이 회전하는 경우에 파워 스펙트럼을 검출하여 기준 영상의 파워 스펙트럼과 DC를 일치시키고 일정한 방향으로 회전하

며 영상의 정합을 시도한다면, 완전히 일치하는 부분이 한번은 존재할 것이다. 이것은 DC를 log-polar 좌표 변환의 중심점으로 정하고 좌표변환하면  $\rho$  값은 일정한 값을 이루며  $\theta$  값에만 변화가 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있게 한다. 특히 파워 스펙트럼이 원점대칭이라는 것을 고려하면,  $\theta$  축을 따라 0에서  $\pi$ 까지 검색하는 것만으로도 기준 영상의 파워 스펙트럼과 동일한 영상을 발견할 수 있을 것이다. 크기 변화가 발생하여 영상이 확대되면 파워 스펙트럼은 축소되는데 그림 6(d)에서 미약하나마 관계를 살펴볼 수 있다. 따라서 DC를 중심으로 그림 6(d)의 파워 스펙트럼을 확대한다면, 일치하는 부분이 한번은 존재하게 된다. 이중 영상인 시그네틱스 74LS73의 파워 스펙트럼인 그림 6(e)는 기준 영상의 파워 스펙트럼과 매우 유사한데 이것은 IC 칩의 외형이 비슷한 것에 기인한다. 그러나 표시된 분자의 차이는 기준 영상과 다른 파워 스펙트럼을 발생시키게 되는데 파워 스펙트럼의 특성상 전대역에서 그 차이가 발생한다. 외형이 다른 DIP 스위치의 파워 스펙트럼인 그림 6(f)는 그림 6(a)와 명확히 차이가 나타나 있다.

이상의 실험을 통하여 파워 스펙트럼은 입력 영상의 위치, 회전, 크기 변화에 무관하게 항상 변화의 중심을 유지하고 있으며 광학적으로 구현이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 파워 스펙트럼을 이용하면, log-polar 좌표변환을 위한 안정된 중심점을 실시간으로 얻을 수 있으며, 위치에 불변한 특성을 이용할 수 있음이 검증되었다.

그림 6의 하단에 나타난 log-polar 좌표변환 영상은 상단의 파워 스펙트럼을 대상으로 log-polar 좌표 변환한 결과를 나타내는 것이다. 세로축은  $\rho$  축을 나타내고 있으며, 가로축은  $\theta$  축을  $-\pi$ 에서  $\pi$ 까지 나타내고 있다. 입력 영상의 회전에 따른 log-polar 좌표변환 결과를 살펴보면, 영상의 회전에 따라 파워 스펙트럼이 회전하고, 파워 스펙트럼을 대상으로 log-polar 좌표변환된 영상은 회전 정도에 따라  $\theta$  축을 좌우로 이동하고 있다. 이것은 입력평면에서 영상이 회전함에 따라 영상을 검출하기 시작하는 시작점이 달라진 것 외에는 변화가 없기 때문에  $\rho$  값은 일정한 값을 이루며  $\theta$  값에만 변화가 발생하는 것이다. 따라서 입력 영상이 회전할지라도 log-polar 좌표변환 평면에서는 영상의 변화 없이  $\theta$  축을 따라 이동 성분으로 나타나게 된다.

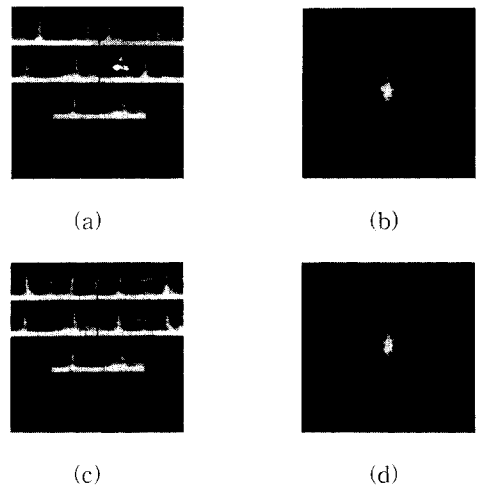


그림 7. 테스트 영상에 대한 인식실험 결과  
 (a) 회전된 영상에 대한 광 NJTC 입력평면  
 (b) 회전된 영상에 대한 상관결과  
 (c) 크기 변화 및 이중 영상에 대한 광 NJTC 입력평면  
 (d) 크기 변화 및 이중 영상에 대한 상관결과  
 Fig. 7. Experimental recognition results on test images.

- (a) Optical NJTC input plane for rotated image
- (b) Correlation output for rotated image
- (c) Optical NJTC input plane for scaled and different image
- (d) Correlation output for scaled and different image

이와 같은 방법으로 얻은 기준 데이터와 외부 입력 데이터의 유사도를 판정하기 위하여 그림 7(a), (c)와 같은 새로운 평면을 구성하였다. 구성된 평면은 광 NJTC의 입력 평면으로 이용되는데 하단의 영상이 기준 영상으로 작용하게 된다. 그림 7(a) 상단의 영상은 좌측하단으로부터 기준 영상, 90° 회전한 영상 그리고 좌측상단으로부터 -45°, 45° 회전한 영상의 불변 데이터이다. 그림 7(b)는  $\rho=0.0$ 으로 설정된 광 NJTC를 이용한 상관 결과로 강한 위상정합을 일으키고 있다. 이때 NJTC의 상관결과에는 동일 평면에 의한 상호상관 성분과 DC가 발생하지 않아야 한다. 그러나 그림 7(b)에는 동일 평면 상관만이 제거되었을 뿐 DC는 명확히 검출되고 있다. 이것은 사용된 공간 광 변조기에서 회절되지 못한 성분으로 보다 고해상도의 공간 광 변조기를 이용하는 것으로 해결이 가능하다. 상관결과에서 상단의 상관첨두치는 중심으로 몰려 있는데, 이것은



log-polar 좌표변환 결과가 반대 방향으로 이동한 것에 기인하고 있다. 그리고 DC 상단의 우측에 나타난 두개의 상관첨두치를 살펴보면, 45° 회전한 영상이 발생시킨 상단 것에 비하여 90° 회전한 영상의 상관첨두치가 보다 우측으로 이동하고 있는데, 하단 것의 회전각이 더 크기 때문이다.

그림 7(c) 상단의 영상은 좌측하단으로부터 기준 영상, 120% 확대된 영상 그리고 좌측상단으로부터 이중 영상인 시그네틱스 74LS73과 DIP 스위치의 불변 데이터를 나타내고, 상관 결과를 그림 7(d)에 나타내고 있다. 여기서 DC를 중심으로 상단의 상관첨두치는 매우 미약하게 발생하여 검출이 어려운 상태에서 하단에 두개의 상관첨두치가 명확하게 검출되어 두개의 영상이 동일하다는 것을 나타내고 있다. 유사 영상인 시그네틱스 74LS73의 상관첨두치는 기준 영상과 IC 칩의 외형에서 동일한 주파수 세기 분포를 포함하고 있으며 기록된 분자가 서로 다른 주파수 세기 분포를 발생시키고 있으므로 좌측상단에 미약한 상관첨두치가 나타나고 있다. 외형자체가 완전히 다른 DIP 스위치는 상관첨두치가 전혀 나타나지 않고 있다. 기준 영상과 유사도가 높다는 것을 나타내는 하단에 상관첨두치의 위치를 비교하면, 우측 것에 비하여 좌측 것이 보다 상단에서 검출되어야 하나 확대 정도가 미약하여 분명한 차이는 검출되고 있지 않다.

이상의 결과를 토대로 회전과 크기변화에 따른 시스템 성능을 보다 자세히 조사하기 위하여 기준 영상을 연속적으로 회전시키며 유사도를 판정하였다. 유사도 판정은 위상과 진폭이 상관에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 NJTC의 p값을 변화시키며 수행하였으며, p=1.0을 이용한 NJTC의 상관첨두치의 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 회전에 따른 결과이며, 크기변화에 따른 결과를 그림 8(b)에 나타내었다. 이때 상관첨두치는 왜곡에 따른 성능을 조사하기 위하여 상관 출력은 정규화하여 나타내었다. 여기서 '●'는 원 영상(금성 74LS93)의 변화에 따른 분포이고, '▲'는 유사 영상(시그네틱스 74LS73) 그리고 '■'는 이중 영상(DIP 스위치)에 대한 분포를 나타낸 것이다.

그림 8(a), (b)에서 발생한 상관첨두치의 변화를 살펴보면, 기준 영상과 동일한 영상이 변화할지라도 유사도 차이가 나타나고 있다. 수학적으로 log-polar 좌표변환하여 구성되는 영상의 데이터는 좌표상의 위치와 밝기 정보가 실수 범위에서 형성되고 있으나, 실험에 이용되

는 디지털 시스템이 정수 범위에서 그 값을 구성함으로써 표현에 따른 양자화 잡음이 포함되어 있다. 그리고 입력 영상의 회전하면 회전에 따른 화소의 새로운 위치가 삼각함수에 의하여 결정되어 동일한 현상에 따른 화소의 손실이 발생한다. 영상의 회전에 따른 이러한 현상은 0°, 90°, 180°, 270°에서는 화소 손상이 발생하지 않아 높은 상관 값을 나타내고 있으며 그 외의 부분에서는 화소 손상에 따른 영향이 나타나고 있다. 크기 변화에서도 역시 영상이 축소되는 과정에서 데이터의 손상이 발생하고 확대되는 과정에서 불필요한 데이터가 부가된 것에 기인하여 확대 및 축소 과정에서 유사도가 감소하고 있다. 특히 회전에 대한 문제는 화소의 손실 폭이 일정한 범위에서 이루어지게 되나, 확대나 축소는 계속적인 화소 손상이 발생하게 되므로 유사도 역시 계속 감소하는 것으로 해석된다.

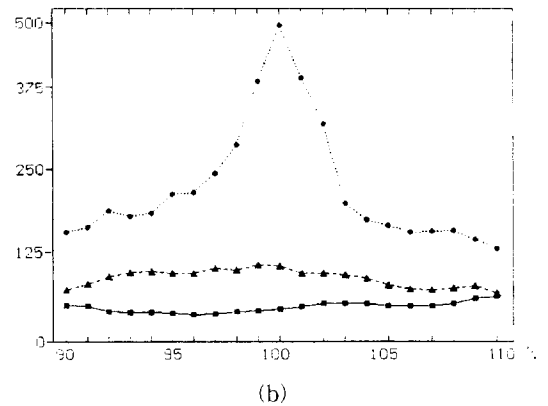
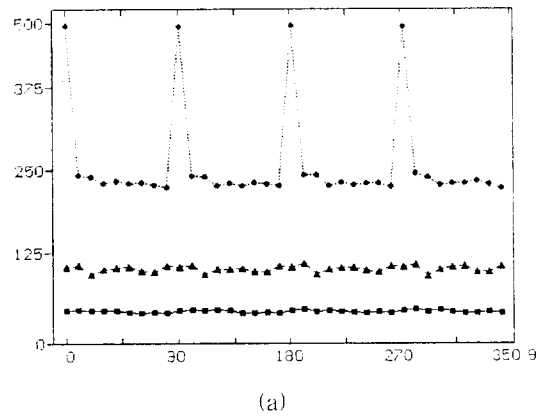


그림 8. 연속적인 변화에 따른 유사도 측정  
(a) 회전에 대한 경우 (b) 크기변화에 대한 경우  
Fig. 8. Similarity measurement with sequential variations.  
(a) Case of rotation (b) Case of scaling

따라서 본 알고리즘을 IC에 적용할 수 있는 범위는 회전에 대해서는 전범위에 적용할 수 있으며, 크기변화는 제한된 범위에서 이루어질 것이다. 그러나 이러한 제한점은 영상의 형태에 영향을 받는 것으로 IC 칩이 아닌 다른 형태의 영상에는 또 다른 변화 분포가 나타나게 될 것이다. 본 논문에서는 회전은 전범위에 적용하였으며, 크기 변화는 그림 8(d)에 나타난 것과 같이  $\pm 10\%$ 에서 적용하였다. 더 이상의 범위에도 적용은 가능하나  $\pm 10\%$  범위에서는 완전한 분리가 발생하여 이중 영상을 명확한 분리할 수 있었다. 이때 적용범위는 기준 영상을 변화하였을 때 변하지 않은 이중 영상을 구별할 수 있어야 한다. 영상의 구별이 어려워지는 분기점에서는 IC 칩의 외형의 유사도가 영상의 변화에 따른 화소의 중첩과 손실보다 상관에 기여도가 높게 된다.

이상의 실험결과 본 논문에서 제시한 왜곡 불변 물체 영상 인식 시스템은 입력 영상의 푸리에 파워 스펙트럼과 회전 및 크기 변화에 불변한 log-polar 좌표 변환 방법을 사용하여 왜곡 불변 특징을 추출하고, 실시간 광 상관기를 이용하여 기준 영상에 대한 유사도를 판정함으로써 영상의 이동, 회전 혹은 크기 변화가 단독 혹은 복합적으로 발생하는 경우에도 효과적으로 물체 인식이 가능함을 보였다. 즉 다중 입력 영상을 대상으로 실험한 결과에서 기준 영상과 비교하여 왜곡이 발생한 영상은 상관점두치의 위치 변화만이 발생하였을 뿐 유사도 변화는 사실상 발생하지 않았다.

## V. 결 론

본 논문에서는 물체 영상의 2차원 푸리에 파워 스펙트럼을 log-polar 좌표 변환하고 광 NJTC를 이용하여 유사도를 판정하는 새로운 광디지털 하이브리드 물체 인식 시스템을 제시하였다. 실시간 구현을 위하여 푸리에 파워 스펙트럼과 NJTC 시스템은 광학적으로 구성하고, log polar 좌표변환은 메모리 대응 방법으로 구성하였다. 제안된 시스템의 성능분석을 위한 인식 실험을 통해서 임의의 상황에서 물체 영상이 주어지더라도 파워 스펙트럼과 log polar 좌표변환을 이용하면, 효과적으로 위치, 회전 및 크기 변화에 불변한 왜곡 불변 특징을 추출하는 것이 가능하다는 것을 검증하였다. 또한 기준 영상과 유사한 형태를 이루는 유사 영상을 입력받아 광 NJTC 시스템을 이용하여 유사도를 측정된 결과 본 논문에서 제시한 푸리에 파워 스펙트럼의 log-polar 좌

표변환 결과는 효과적인 영상분류가 가능함을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 물체 인식 시스템의 신뢰도를 시각화할 수 있었다. 따라서 이러한 왜곡 불변 물체 인식 시스템은 앞으로 로봇 시각 및 자동감시 등과 같은 분야에서 그 응용 가능성이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. N. Hsu and H. H. Arsenault, "Optical Pattern Recognition using the Circular Harmonic Expansion," *Appl. Opt.*, vol.21, no.22, pp.4016-4019, 1982.
- [2] D. Casasent and D. Psaltis, "Scale Invariant Optical Correlation using Mellin Transforms," *Opt. Comm.*, vol.17, pp.59-63, 1976.
- [3] D. Casasent and D. Psaltis, "Position, Rotation, and Scale Invariant Optical Correlation," *Appl. Opt.*, vol. 15, no.7, pp.1795-1799, 1976.
- [4] C. S. Weaver and J. W. Goodman, "A Technique for Optically Convolution Two Function," *Appl. Opt.*, vol.5, no.7, pp.1248-1249, 1966.
- [5] 이상이, 김은수, "상관신호 판별력 개선을 위한 광 BPEJTC 시스템," 대한전자공학회논문지, 31-A 권, 6호, pp.705-714, 1994
- [6] 이상이, 양훈기, 김은수, "Sigmoid 함수를 이용한 NJTC 시스템의 상관 판별력 해석," 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, 17권, 1호, pp. 271-274, 1994
- [7] Y. Saito, S. Komatsu and H. Ohzu, "Scale and Rotation Invariant Real Time Optical Correlator using Computer Generated Hologram," *Opt. Comm.*, vol.47, no.1, pp.708-711, 1983.
- [8] R. Jain, S. Bartlett, and N. O'Brien, "Some Experiments in Ego-motion Complex Logarithmic Mapping" *Advances in Computer Vision and Image Processing*, vol.3, pp.145-177, 1988.
- [9] D. Casasent, S. F. Xia, A. J. Lee and J. Z. Jung, "Real-time Deformation Invariant Optical Pattern Recognition using Coordinate Transformations," *Appl. Opt.*, vol.26, no.5, pp.938-942, 1987.
- [10] F. T. S. Yu and X. J. Lu, "A Real Time Programmable Joint Transform Correlator," *Opt. Comm.* vol.52, no.1, pp.10-16, 1984.

[11] T. Kotzer, J. Rosen, and J. Shamir, "Phase Extraction Pattern Recognition," *Appl. Opt.*, vol.31, no.8, pp.1126-1137, 1992.

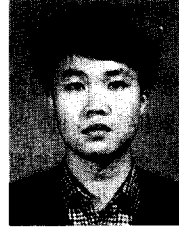
[12] G. G. Mu, X. M. Wang, and Z. Q. Wang, "Amplitude-Compensated Matched Filtering," *Appl. Opt.*, vol.27, no.16, pp.3461-3463, 1988.

---

저 자 소 개

---

李 相 二(正會員) 第 32卷 A編 第 10號 參照  
 현재 광운대학교 대학원 전자공학  
 부 박사과정



蔡 滌 秉(準會員)  
 1965년 11월 23일생. 1994년 2월  
 국립 서울 산업대학교 전자공학과  
 졸업(공학사). 현재 광운대학교  
 대학원 전자공학부 석사과정. 주  
 관심분야는 패턴인식 및 광 신호  
 처리 등임

李 丞 玄(正會員) 第 32卷 A編 第 10號 參照  
 현재 광운대학교 전산원 조교수

金 恩 洙(正會員) 第 32卷 A編 第 10號 參照  
 현재 광운대학교 전자공학부 교수