

# 광회전 커널 오퍼레이션을 이용하는 방향성 정보 처리

## (Directional Information Processing Using Optical Rotating Kernel Operations)

李 林 杰\*

(Yim Kul Lee)

### 要 約

광회전 커널 오퍼레이션을 이용하는 비선형 정보 처리 방법이 2차원 방향성 정보 처리에의 응용과 함께 소개된다. 2차원 입력의 각 점에서 길고 폭이 좁은 커널이 회전할 때 커널의 각 회전각에 대한 컨볼루션(convolution) 출력이 얻어지며 최종 출력은 응용에 따라서 컨볼루션 값의 함수로서 주어진다. 커널과 같은 방향으로 놓여 있는 선형 특징은 강조되고 그 외의 잡음 요소는 제거 또는 크게 감쇄된다. 처리되는 선형 특징의 길이 및 폭의 넓은 변화에 강하며 입력의 낮은 명도(contrast)와 공간 위치에 따른 밝기의 변화에 대해서도 우수한 특성을 보여준다. 사용되는 커널의 길이와 폭의 변화가 선형 보강 응용에 주는 영향과 수행 속도를 높이기 위한 광학적 구현 방법이 논의된다.

### Abstract

A nonlinear method for directional information processing is introduced, along with an application of directional feature enhancement. In this method, an input is convolved with a 2-D long, narrow kernel, which is rotated through 360 degree, continuously or discretely in a large number of steps. An output is given by some function of the convolution results. Linear features that are aligned with the kernel are enhanced, otherwise, removed or suppressed. The method presented is insensitive to variation in the dimension of linear features to be processed and preserves a good enhancement capability even for an image characterized by low contrast and spatially varying brightness in noisy background. Effects of the kernel length and width on the performance are discussed. A possible hybrid optical-electronic implementation is also discussed.

### 1. 서 론

선형(Linear) 또는 준선형(quasilinear) 특징

(feature)은 여러 종류의 2차원 입력 정보에서 나타나게 되는데 예를 들면 사진에 나타나는 인조물체의 경계면<sup>[1]</sup>, SAR 영상의 바다물결<sup>[2]</sup>, 지도에 나타나는 도로들<sup>[3]</sup>, 그리고 방사선 영상의 다양한 생물학적 구조<sup>[4,5]</sup> 등 산업형 응용과 의료 진단의 여러 분야에서 이러한 특징을 가지는 2차원 정보를 다루어야 할 경우가 많다. 또한 평행한 선들의 직선쌍 또는 많은 직선의 그룹들도 다루게 되는데 공항의 활주로, 지진파

\* 正會員, 韓國科學技術研究院 光電子研究室  
(Korea Institute of Science and Technology  
Optical Electronics Laboratory)

接受日字: 1992年 5月 30日

의 정보 [6,7], 지문 [7], 생물학적 표피 [4,5,8] 등에 보여진다. 영상 또는 2차원 패턴에서 원하는 정보를 얻기 위한 목적으로 선형 특징을 보강, 추출하기 위한 여러 가지 디지털 방법이 개발되었는데 그 중에 Hough Transform [9,10], Radon Transform [2,11,12], fan-type filters [13-15], 그리고 human visual model [16] 등을 이용하는 방법 [8] 들이 있다. 폭넓은 밝기의 변화와 잡음 배경에 놓여 있는 선형 특징들을 보강 추출하기 위하여 이러한 방법들을 unsupervised mode로 이용할 때 취약한 경우가 생기는데 특히 추출하고자 하는 선형 특징의 크기(길이와 폭)가 폭넓은 변화를 가지는 경우이다. 더우기 자동화 보강 방법이 요구되는 경우에는 필연적으로 strong human interaction 이 중요한 역할로 대두되며 경우에 따라서는 원하는 목적을 얻을 수 없는 경우가 생기게 된다. [17]

최근에 광회전 커널 최소-최대 변환법이 선형 특징의 보강 응용 예와 이를 수행하기 위한 incoherent optical convolver가 함께 제안되었다. [17,19] 이 변환 방법은 2차원 입력 패턴, 한 예로 2차원 영상의 각 점을 중심으로 하는 좁은 영역에서 방향성 정보를 효과적으로 강조하기 위한 비선형 처리 방법이다. 선형 특징 보강에 이 방법을 응용할 경우 처리되는 입력 영상이 낮은 명암(low contrast)과 공간에 따른 밝기의 변화를 가지는 배경하에서도 주목할 만한 보강 특성을 가지게 된다.

본 논문은 기본 광회전 커널 오퍼레이션과 그 응용인 직선 성분 보강 및 추출을 위한 2차원 커널의 소개와 응용시 커널의 크기(dimension)와 모양(1-D profile)이 보강 특성에 미치는 영향을 정성적으로 논의된다. 2장에서는 광회전 커널 최소-최대 변환법(rotating kernel min-max transform: RKMT) 방법을 간단히 복습하고 선형 특징 보강을 위해 사용 가능한 커널의 모양이 소개된다. 광회전 커널에 의한 선형 특징 보강 방법과 사용되는 커널의 길이와 폭에 의한 영향이 3장에서 논의된다. 4장에서 RKMT 방법을 수행할 수 있는 광학적 구현 방법이 논의되고 5장에서 본 논문이 요약된다.

## II. 광회전 커널 최소-최대 변환법

### 1. 복습 및 변환 함수

광회전 커널 최소-최대 변환법(rotating kernel min-max transformation : RKMT)은 입력 영상에 있는 각 점을 중심으로 하는 지역적인 원형 공간(local-circular region)에서 얻어진 방향성 정보를 활용한다. 특정한 방향성을 가진 선형 특징에 관한

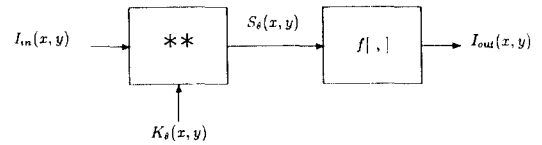


그림 1. 광회전 커널 최소-최대 변환법에 대한 블록 다이어그램. 최종출력은 입력과 2-D 커널 사이의 컨볼루션 출력으로부터 얻어지는 최대, 최소값의 함수로 주어진다.

Fig. 1. A block diagram of the RKMT operation. The output  $I_{out}(x,y)$  is given by an application-dependent function  $f[.]$  of  $Max(x,y)$  and  $Min(x,y)$ .

정보를 추출하기 위해 RKMT 방법이 우수한 성능을 보이며 사용될 수가 있는데 그림 1은 이에 대한 블록 다이어그램이다. [17] 입력 영상 또는 2차원 입력 패턴이 길고 좁은 비원형성(noncircular) 대칭형 또는 비대칭형 모양(profile)을 가진 2차원 커널과 컨볼브된다. 커널이 연속적 또는 불연속적으로 한 주기 동안에 많은 수의 스텝(step)으로 회전할 때 입력과 커널 사이에서 얻어지는 컨볼루션 출력은 식 (1)과 같이 표시된다.

$$S_0(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(x-p,y-q)K_0(p,q)dpdq \quad (1)$$

식 (1)에서  $O(x,y)$ 는 2차원 입력 영상이고 커널  $[=K_0(x,y)]$ 은 각도를 통해 회전한다. 커널이 회전할 때 컨볼루션 출력인  $[=S_0(x,y)]$  식 (1)의 값이 모니터(monitor)되고 각 점  $(x,y)$ 에서 얻어지는 식 (1)의 최대값  $[=Max(x,y)]$ 과 최소값  $[=Min(x,y)]$ 이 저장된다.  $Max(x,y)$ 와  $Min(x,y)$  값은 식 (2)와 (3) 같이 정의된다.

$$Max(x,y) = \text{maximum}\{S_0(x,y); 0 \leq \theta < 360^\circ\}, \quad (2)$$

$$Min(x,y) = \text{minimum}\{S_0(x,y); 0 \leq \theta < 360^\circ\}, \quad (3)$$

출력  $I_{out}(x,y)$ 은 적용 대상에 따라서  $Max(x,y)$ 와  $Min(x,y)$  값의 조합에 의한 비선형 매핑(nonlinear mapping)으로 다음 식과 같이 주어진다:

$$I_{out}(x,y) = f[Max(x,y), Min(x,y)] \quad (4)$$

식 (4)에서와 같이  $\text{Max}(x,y)$ 와  $\text{Min}(x,y)$ 에 의해서만 주어지는 비선형 매핑에 의해서 다양한 형태의 방향성 영상 처리와 2차원 패턴 인식 및 분석이 가능하며 RKMT 방법의 확장으로서 angularly rank-ordered filtering을 포함하는 다양한 방향성 정보 처리(directional information processing) 응용에도 사용될 수 있다.<sup>[17]</sup>

2. 2차원 방향성 커널

방향성 특징을 보강 추출하기 위한 기본 RKMT operations을 위해 여러 가지 모양의 커널이 사용될 수가 있는데 크게 대칭형과 비대칭형의 두 그룹으로 나뉘어진다. 대칭형 커널에는 2-D rectangular, parabolic, triangular, exponential, and Gaussian profiles이 포함된다. 사용되는 커널의 대칭성으로 0°에서 180°까지의 컨볼루션 출력만이 필요하게 된다. 그림 2(a)와 (b)는 대칭형 rectangular and triangular 커널의 측면도를 보여준다. 그림 2(c)와 (d)는 대응되는 비대칭형 커널이다. 그림 2에

서 y방향으로의 profile은 Gaussian profile이 나은 성능을 보이리라 기대된다. Rectangular profile의 한 변형된 형태로 하나의 + mark profile 또는 두 개의 대칭형 rectangular 커널을 커널의 중앙에서 직각으로 교차시킨 것을 생각할 수가 있다. 그림 2에 있는 rectangular profile 커널은 커널 자체의 모든 점들이 같은 weight를 가지므로 해서 선형 특징 보강시 처리되는 선형 특징이 두꺼워지거나 처리되는 2차원 세부 정보를 잃게 되는 경우가 생길 수 있다. 이러한 경우 그림 2(a)에 있는 rectangular kernel의 중앙에 임펄스를 가지는 커널을 사용하면 이와같은 thickening과 smoothing 효과를 줄일 수 있다.<sup>[17]</sup> 그림 2(b)에 보여지는 nonrectangular 커널인 경우 커널의 중앙에서 멀리 떨어진 곳에 위치한 점들은 중앙에 가까이 있는 점들에 비해 컨볼루션 출력에 대한 기여도가 작게되고 선형 특징의 thickening 효과는 줄어든다. 유사한 효과가 Gaussian profile과 같은 다른 nonrectangular profile 커널에서도 얻어진다.

Ⅲ. 방향성 정보 처리

그림 3은 방향성 정보 처리(directional information processing)를 위한 광회전 커널 오퍼레이션(rotating kernel operations)에 의한 결과를 보여준다. 그림 3(a)는 인위적으로 생성된 256×256 화소(pixels)를 가지는 영상으로 0, 45, 90, 135°의 방향성을 가지는 직선 성분을 포함하고 있으며, 좌상

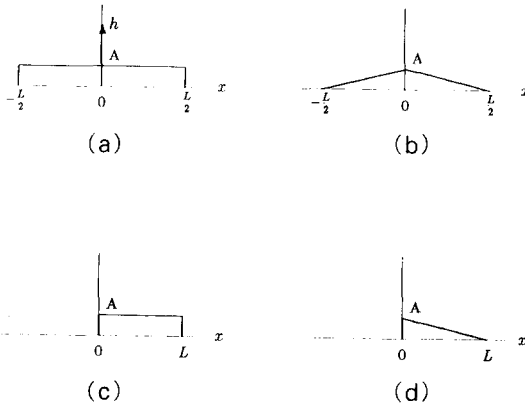
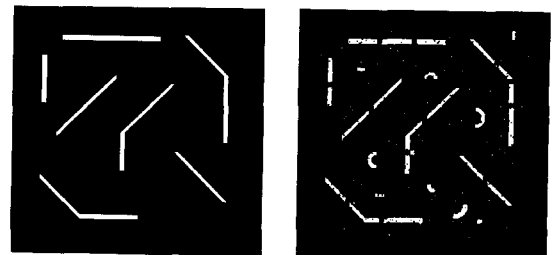


그림 2. 2차원 커널의 측면도

- (a) 대칭형 rectangular profile
- (b) 대칭형 triangular profile
- (c) 비대칭형 rectangular profile
- (d) 비대칭형 triangular profile.

Fig. 2. 1-D representation (broad side view) of 2-D kernels.

- (a) symmetric rectangular profile (impulse at center may be excluded).
- (b) symmetric triangular profile:
- (c) asymmetric rectangular profile.
- (d) asymmetric triangular profile.



(a) (b)

그림 3. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 인위적으로 생성된 256×256 화소의 영상: (a) 잡음없는 영상; (b) 잡음이 포함된 영상.

Fig. 3. Synthetic test images (256×256 pixels) used for numerical experiments: (a) noiseless image, (b) noisy input image.

단에 있는 직선 성분은 길이  $L=50$ , 폭  $W=5$ 를 가진다. 그림 3(a)에 짧은 직선, 곡선, 그리고 임펄시브 잡음(impulsive noise)의 잡음 성분을 더함으로써 얻어진 영상이 그림 3(b)에 보여진다. 커널이 회전할 때 그림 3(b)에 있는 영상이 커널과 컨볼루션되는데 그림 4는 이 네 방향에서 얻어진 컨볼루션 결과를 보여준다. 사용된 커널은 방향성을 가진 길이  $L=25$ , 폭  $W=1$ 인 2차원 rectangular 커널이다. 그림 4(a)에서는  $0^\circ$ 에 향해 있는 직선 성분만이 다른 방향에 놓여 있는 직선이나 잡음에 비해 상대적으로 강조되어 있는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 4(c-d)에서도 각 커널 방향에 나란히 놓여있는 직선 성분만이 두드러지게 강조되는 것을 볼 수 있다. 이 선형 특징 보강을 위해 사용되는 커널이 길어질수록 잡음의 영향은 줄고 직선 성분 또는 선형 특징의 연결성(connectivity)은 증가하게 된다.

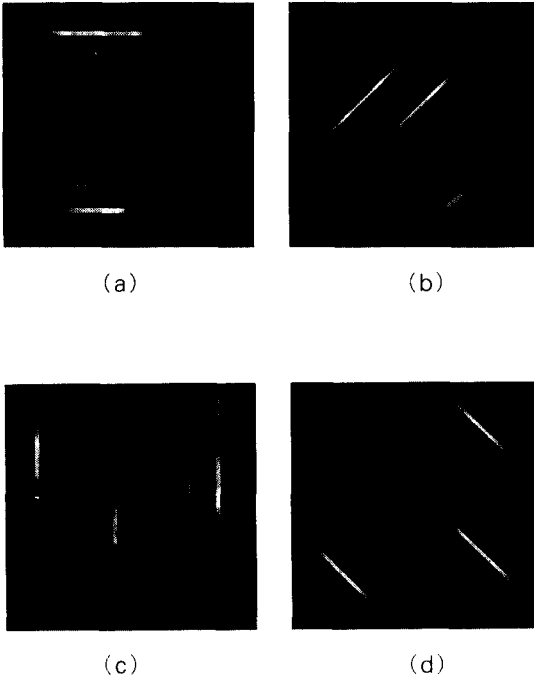


그림 4. 네 커널 방향에서 얻어진 컨볼루션 출력  
(a)  $=0^\circ$  (b)  $=45^\circ$  (c)  $=90^\circ$  (d)  $=135^\circ$ .  
Fig. 4. Convolution outputs obtained at four kernel orientations:  
(a)  $=0^\circ$ , (b)  $=45^\circ$ , (c)  $=90^\circ$ , (d)  $=135^\circ$ .

그림 4에서 얻어진 결과를 토대로 선형 특징의 추출을 위한 한 방법으로 최대값과 최소값의 차  $d(x,$

$y) [=Max(x,y)-Min(x,y)]$  를 구할 수가 있다. 직선 성분 위에 있는 점들 위에서는 차  $d(x,y)$ 가 크고, 짧은 직선 성분, 곡선, 그리고 임펄시브 잡음 성분 위에 있는 점들에서는 상대적으로 작게 될 것이다. 그 결과는 다른 특징들에 비해 직선 성분의 두드러진 보강 효과이다. 그림 5(a)는  $L=25, W=1$ 을 가지는 rectangular profile 커널을 그림 3(b)에 적용하여 차  $d(x,y)$ 를 계산해서 얻어진 gray-scale을 이진화(binanzation)한 영상이다. 더 나은 선형 보강 효과를 컨볼루션 출력으로부터 최대값을 찾는 Max operation과 차  $d(x,y)$ 를 구하는  $[Max-Min]$  operation을 연속적으로 적용하는 cascade operation으로부터 얻을 수 있다. 이 경우 Max operation은 선형 특징을 smoothing 하고 잡음 성분을 감소하는 효과를 가지면서 선형 특징을 pre-enhance하게 된다. 이 Max operation에 의해 잘려진 직선 성분이 연결되는 효과를 가지게 된다. 그

그림 6. 커널 길이를 변화시키면서 얻은 직선 성분 보강 효과: (a)  $L=15$ : (b)  $L=25$ : (c)  $L=37$ : (d)  $L=49$ .

Fig 6. Enhancement of straight lines for different kernel lengths: (a)  $L=15$ : (b)  $L=25$ : (c)  $L=37$ : and (d)  $L=49$ .

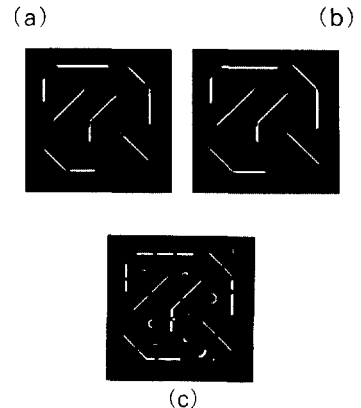


그림 5. 직선 성분을 추출한 결과: (a)  $[Max-Min]$  오퍼레이션: (b) cascade 오퍼레이션: (c) median filtering ( $3 \times 3$  mask).  
Fig. 5. Results of applying directional operations (a)  $[Max-Min]$  operation (b) cascade operation and (c) median filtering ( $3 \times 3$  mask).

림 5(b)는 (a)를 위해 사용된 커널을 사용하여 cascade operation으로부터 얻은 gray-scale 영상을 이진화한 결과이다. RKMT 방법에 의한 선형 보강 능력을 보이기 위해 기존의 median filtering ( $3 \times 3$  mask)으로부터 얻은 결과가 그림 5(c)에 보여진다. 그림 5에서 보여지는 것처럼 RKMT 방법에 의해 잡음 배경에 놓여 있는 방향성 정보 즉 직선 성분이 보강 추출되는 것을 볼 수 있다. 이 cascade operation에서 입력 영상에서 배경의 밝기가 상대적 위치에 따라 달라도 밝기가 일정한 지역(uniform region)에서는 [Max-Min] operation에 의해 배경의 영향을 없앨 수 있고 그 외의 지역에서는 밝기 변화의 영향을 줄이게 된다. 유사한 처리 결과를 triangular profile 커널을 사용해서 얻을 수가 있다.<sup>[17-19]</sup>

그림 5에서 특정한 크기( $L=25$ ,  $W=1$ )의 rectangular 커널을 사용하여 선형 보강의 효과를 얻었지만 RKMT operation 자체가 사용되는 커널의 길이와 폭의 영향을 받게 되므로 이에 대한 영향

을 조사하는 것이 필요하다. 그림 6은 커널 길이의 변화에 따른 선형 특징 보강 효과를 정성적으로 보여 주기 위해 그림 3(b)의 잡음이 섞인 영상에 rectangular 커널( $W=1$ )을 가지고 cascade operation과 thresholding-hardlimiting을 연속적으로 적용하여 얻은 결과들이다. 그림 6(a)에 보여지는 것처럼 짧은 커널 길이( $L=15$ )에서는 잡음이 민감하게 되고 너무 짧아지게 되는 경우에는 선형 보강 능력을 잃게 된다. 길이  $L$ 이 점차 증가함에 따라서 보강 능력을 보이며 폭넓은 길이 범위에서 상응되는 효과를 얻을 수 있다. 길이가 증가함에 따라서 세부 입력 특징이 smoothing 되거나 보강을 수행하는 동안에 smearing 되는데 이러한 영향을 줄이기 위해서 nonrectangular profile 커널을 사용할 수 있고 또는 rectangular 커널의 중앙에 임펄스를 갖는 커널(그림 2(a))이 사용될 수 있다. 사용되는 커널을 길게 택함으로써 선형특징의 교차 위치와 같은 세부 정보가 smoothing 되는 경우가 있지만, 일반적으로 길이가 증가함에 따라 큰 선형 특징의 연결성(connectivity)을 얻게 된다. 그림 6(b-d)는  $L=25$ , 37, 49 ( $W=1$ )인 커널을 사용해서 얻은 결과이다. 이 그림들로부터  $L$ 의 넓은 범위에서 유사한 효과를 얻을 수 있음이 보여진다.<sup>[17]</sup>

커널폭의 영향을 고려하는 것도 선형 보강 효과를 이해하기 위해 중요하게 되는데 폭이  $W$ 인 무한히 긴 직선 성분과 길이  $L$ 과 폭이  $W$  ( $L \gg W$ ,  $L \gg W'$ )인 rectangular 커널을 생각해 본다. 그림 7은 세 가지 다른 경우, 즉 (a)  $W=W'$ , (b)  $W(W')$ , (c)  $W > W'$ 인 경우에 대한 결과를 보여 준다. 각 경우에서 최대값  $[=Max]$ 은 직선 성분상의 점들에서는 커널이 직선 성분과 나란할 때 얻어진다. 직선 성분과 커널은 각 경우에 대해서 왼쪽에 보여지고 최대값은 x축을 따라 오른쪽에 보여진다. (z축은 영상 평면에 수직이다.)  $W=W'$ 인 경우 그림 7(a)에서처럼 최대값이 직선 성분의 양쪽에서 단조하게 감소한다. 이 효과는 다음과 같이 수치적으로 보여질 수가 있다.  $W=5$ ,  $W'=5$ ,  $L=15$ 인 경우, 직선 성분을 가로지르는 점들을 따라 최대값은 직선 성분의 한쪽에서부터 다른 한쪽으로 가면서  $\dots 45, 60, 75, 60, 45 \dots$ 로 주어진다. 이들 최대값 가운데 가장 큰 값인 75가 직선 성분의 가운데에서 얻어지게 되며 결과는 중앙에서의 보강 효과이다. 처리된 영상이 적당한 gray-level에서 이진화되면 가는 직선 성분이 얻어진다. 이 특성을 [Max-Min] operation과 함께 사용하면 직선 성분의 중앙에서의 보강 뿐만이 아니라 세선화(thinning)의 효과도 얻을 수가 있다. 그림 7(b)와 (c)에서 최대값은 직선 성분의 중앙 부근에서 같은 값

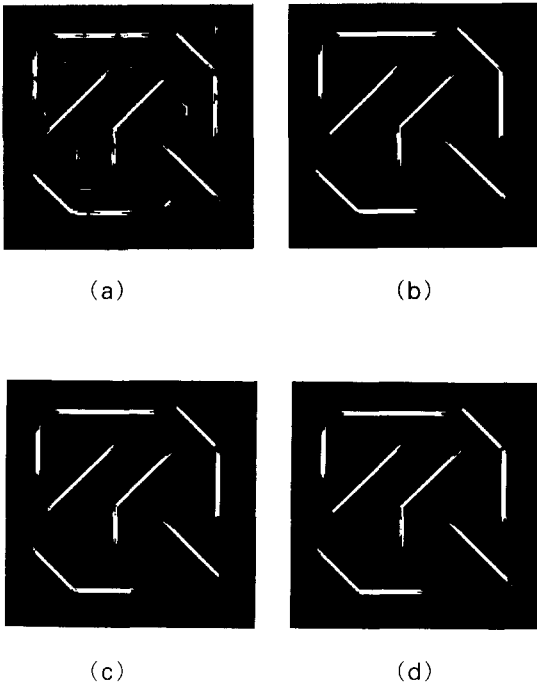


그림 6. 커널 길이를 변화시키면서 얻은 직선 성분 보강 효과 (a)  $L=15$  (b)  $L=25$  (c)  $L=37$  (d)  $L=49$ .

Fig 6. Enhancement of straight lines for different kernel lengths (a)  $L=15$ , (b)  $L=25$ , (c)  $L=37$ , and (d)  $L=49$ .

(plateau 형성)을 가지며 양쪽에서 단조 감소한다.<sup>[17]</sup>

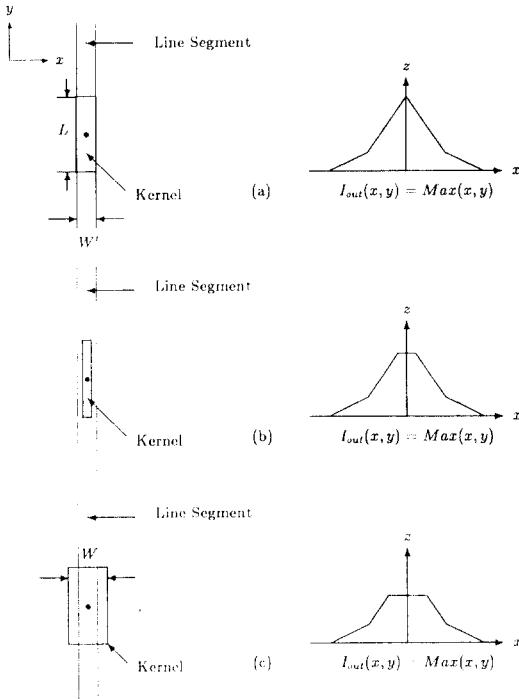


그림 7. 커널 폭에 의한 영향: (a)  $W = W'$  (b)  $W < W'$  (c)  $W > W'$ . L과 W는 커널의 길이와 폭이고  $W'$ 은 처리되는 직선 성분의 폭이다.

Fig. 7. Effects of kernel width on the enhancement of straight-line features: (a)  $W = W'$  (b)  $W < W'$  (c)  $W > W'$ . L and W are the length and width of the kernel.  $W'$  is the width of straight-line features.

#### IV. 광학적 구현 방법

광회전 커널 오퍼레이션은 컴퓨터나 디지털 전용 영상처리기를 사용하면서 구현될 수가 있지만 이 방법 자체가 2차원의 큰 커널에 대해 많은 횟수의 공간 컨볼루션과 많은 수의 커널 회전이 요구되고 얻어지는 많은 양의 데이터 처리 과정을 거쳐야 하기 때문에 디지털 컴퓨터만으로는 많이 시간이 소요된다. 컨볼루션 출력으로부터 최대값  $[= \text{Max}(x, y)]$ 을 구하는 Max operation을 예로 들면, M개의 커널 방향에 대해서  $D \times D$  pixels을 가진 입력영상이  $L \times W$ 의 크기를 가지는 2차원 커널과 컨볼루션될 경우 요구되

는 multiplications과 additions의 수는 직렬처리(serial processing)인 경우  $2LWMD^2$ 이고 병렬처리(parallel processing)인 경우에는(단,  $3 \times 3, 5 \times 5$ 와 같이 커널이 작은 경우에 가능)  $2LWM$ 이 된다. 이 두가지 경우에 대해서 커널의 길이와 폭 그리고 입력영상의 해상도( $=D \times D$ )가 증가할 때 계산되어야 하는 수는 급격히 증가하게 된다. 이러한 계산량의 부담으로 parallel processing과 한 커널 방향에 대해서 실시간 구현(real-time implementation)이 가능한 hybrid optical-electronic 구현이 바람직하게 된다.

하나의 coherent optical system이 식 (1)에 주어 진 컨볼루션을 수행하기 위해서 사용될 수도 있다. 이러한 경우 coherent system은 몇 가지 단점이 있게된다. 그 중의 하나는 입력분포가 복소파형 크기분포(complex wave amplitude distribution)로 되어 있어야 한다. 따라서, 고해상도 TV나 LED array가 2차원 입력 display용으로 직접 사용될 수가 없고 incoherent-to-coherent converter를 사용하여 입력분포를 coherent 형태로 변환시켜야 한다. 또한 coherent noise와 출력단에 있는 detector의 dynamic range가 단점이 될 수가 있다. 예를 들면 convolution 출력의 three orders의 dynamic range를 가지는 출력 분포를 측정하기 위하여 사용되는 detector의 intensity 응답이 출력 분포의 six orders를 변화할 수 있어야 한다.

앞에서 제기되는 문제들이 incoherent system<sup>[20,21]</sup>을 사용하는 경우에는 이러한 점들이 문제되지 않는다. RKMT operations을 위해서 사용되는 커널은 전형적으로 real, non-negative이므로 하나의 incoherent spatial filtering이 hybrid components를 병합해서 기본 RKMT operation을 확장하는 directional information processing을 위해 사용될 수가 있다. 그림 8은 광회전 커널 오퍼레이션을 위한 한 incoherent spatial filtering system을 보여준다.<sup>[17,19]</sup> 홀로그래픽 적으로 기록된 pupil transparency<sup>[22]</sup> 또는 컴퓨터 생성 홀로그램(computer generated hologram)<sup>[23]</sup>이 컨볼루션 커널을 결정하기 위하여 pupil plane에 사용된다. 보통의 경우 홀로그래픽적으로 기록된 커널은 광축에서 벗어난 위치로 회절(diffraction)되고 그 결과로 컨볼루션 출력이 광축 주위로 아아크(arc) 모양으로 회전하게(swing) 된다. 그림 8에서 보는 것처럼 pupil mask를 만들 때 사용한 프리즘을 pupil transparency와 붙여 사용함으로써 컨볼루션 출력의 중앙을 광축에 위치시켜 회전시킬 수가 있다.

이러한 광학적 구현에 있어서 회전하는 컨볼루션

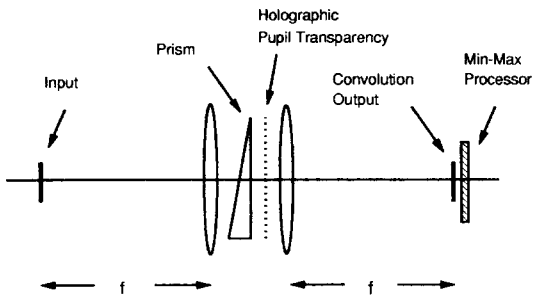


그림 8. 광회전 커널 오퍼레이션을 위한 한 광학적 구현 방법. 프리즘은 홀로그래픽 캐리어를 보상한다. 광축에 원하는 컨볼루션을 얻기 위해서 프리즘과 홀로그램 이 한 짝으로서 회전한다.

Fig. 8. One possible hybrid optical implementation. Incoherent optical convolver with electronic min-max processor in output plane. The prism compensates for holographic carrier. Prism and hologram turn as a pair to rotate on-axis convolution kernel. Min-Max processor performs Min-Max calculations.

커널을 구현하기 위해서 두 가지 방법을 생각할 수 있는데 pupil transparency(i.e., 컨볼루션 커널)을 기계적으로 회전시키거나 또는 원하는 profile을 가지는 커널을 대응하는 각 방향에 대해서 liquid crystal spatial light modulator (LC SLM)에 전자적으로 writing 하는 것이다. 이 두 방법이 디지털 컴퓨터를 사용해서 대응하는 커널을 회전시키는 것보다 훨씬 빠르게 구현되리라 기대되며 특히 고해상도의 2차원 영상(high definition image)인 경우 순수 디지털 처리 방법보다 속도 면에서 우수한 특성을 나타낼 수 있다. 이 효과는 광학적 컨볼루션 방법이 커널의 크기(e.g.,  $41 \times 5$  pixels)와 입력 영상의 해상도(e.g.,  $1024 \times 1024$  pixels)에 상관없이 순간적으로, 동시에 수행될 수 있기 때문에 얻어지는 결과이다.

기본 광회전 커널 오퍼레이션 뿐만이 아니라 최대값과 최소값을 중심으로 하는 기본 RKMT operation의 경우 각 커널 회전각에서 얻어진 컨볼루션 값으로부터 최대값과 최소값을 결정해야한다. 그림 8에서 300커널 회전각에 대해서, TV 카메라를 출력 detector로 사용할 경우 초당 30frames을 가정하고 비대칭형 커널인 경우 0.26 - 10초가 한 화상을 처리하는데 소요되고 대칭인 경우 0.13 - 5.0초가 걸

린다. 이처럼 digitizing TV 카메라가 detecting device로 사용될 경우 처리 속도는 TV frame rate에 제한된다. detector array가  $\text{Max}(x,y)$ 와  $\text{Min}(x,y)$  값을 직접 검출(detect) 하기 위해 간단한 peak-detection 전자회로와 함께 집적화 되면 훨씬 빠른 속도가 얻어질 수 있다. 다른 한 방법으로 현재는 상업적으로 구입 가능하지 않지만 향후 연구 방향으로 Max와 Min 값을 검출하고 간단한 산술연산(arithmetic operations)을 할 수 있는 고기능 공간 광변조기(smart spatial light modulator)를 고려할 수가 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 광회전 커널 최소-최대 변환법(RKMT)이 소개되고 이를 선형 특징 보강에 적용하면서 사용되는 2차원 커널의 길이와 폭이 보강 효과와 능력에 미치는 영향을 논의되었다. 주어진 커널에 대해서 우수한 직선 성분 보강 효과를 보여 주었으며 사용되는 커널의 길이가 길수록 직선 성분의 연결성(connectivity)이 증가되며 커널 길이가 상대적으로 너무 짧을 때에는 잡음성분에 민감하게 된다. 또한 사용되는 커널의 폭이 처리되는 직선 성분의 폭과 같을 경우 직선 성분의 중앙에서 보강효과가 얻어지고 이진화 과정을 거치면 세선화 효과도 얻을 수 있다. 직선 성분 보강의 효과는 다양한 모양의 2차원 커널을 사용함으로써 얻어질 수 있는데 nonrectangular 커널을 사용함으로써 thickening은 줄어들게 된다. 이러한 보강 효과는 컨볼루션 출력으로부터 단순히 최대값을 구함으로 얻을 수 있지만 공간 위치에 따른 밝기의 변화를 없애기 위해 [Max-Min] operation에 의해서도 가능하고 또한 cascade operation을 통해 더 나은 직선 성분의 연결성과 잡음 성분의 감소가 이루어졌다. 이 광회전 커널 오퍼레이션을 광학적으로 구현하기 위한 방법으로 LC SLM을 사용하여 커널 회전을 얻는 방법과 기계적 회전을 통해 원하는 컨볼루션 출력을 광축에서 얻는 방법이 논의되었다. 기본 RKMT 방법을 확장하는 폭넓은 방향성 정보 처리가 가능한데 예를 들면 방향성 영상 처리, 비선형 feature detection<sup>[17]</sup>, 패턴 인식 및 처리<sup>[17,24]</sup>, edge detection<sup>[25]</sup> 등도 가능하리라 기대된다.

#### 參考文獻

- [1] A. Dudani and A. L. Luk, "Locating

- straight-line edge segments on outdoor scenes," *Patt. Recog.*, Vol. 10, pp. 145-157, 1978.
- [2] M. Murphy, "Linear feature detection and enhancement in noisy images via the Radon transform," *Patt. Recog. Lett.*, Vol. 4, pp. 279-284, 1986.
- [3] Z. Zhu and Y. Kim, "Algorithm for automatic road recognition on digitized map images," *Opt. Eng.*, vol. 28(9), pp. 949-954, 1989.
- [4] Y. J. M. Pouliquen, "Fine structure of the corneal stroma," *Cornea*, Vol. 3, pp. 168-177, 1985.
- [5] E. Peli, T. R. Hedges(III), and B. Schwartz, "Computerized enhancement of retinal nerve fiber layer," *Acta Ophthalmol.*, vol. 64, pp. 113-122, 1986.
- [6] A. F. Lehar and R. A. Gonsalves, "Locally adaptive enhancement, binarization, and segmentation of images for machine vision," in *Applications of Digital Image Processing VII* (A.G. Tescher, ed.), vol. 504, pp. 183-188, 1985.
- [7] K. Y. Huang, K. S. Fu, T. H. Sheen, and S. W. Cheng, "Image processing of seismograms: (a) Hough transformation for the detection of seismic patterns: (b) thinning processing in the seismogram," *Patt. Recog.*, vol. 18, pp. 429-440, 1985.
- [8] E. Peli, "Adaptive enhancement based on a visual model," *Opt. Eng.*, vol. 26 (7), pp. 655-660, 1987.
- [9] P. V. C. Hough, "Method and means of recognizing complex," U.S. Patent 3,069,654, 1962.
- [10] R. O. Duda and P. E. Hart, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures," *Commun. ACM*, vol. 15(1), pp. 11-15, 1972.
- [11] J. Radon, "Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte tanges gewisser mannigfaltigkeiten (on the determinatin of functions from their integrals along certain manifolds)," *Math. Phys. Klass.*, vol. 69, pp. 262-277, 1917.
- [12] S. R. Deans, *The Radon Transform and Some of Its Applications*, New York: John Willey, 1982.
- [13] E. Peli and J. G. Verly, "Digital line-artifact removal," *Opt. Eng.*, vol. 22 (4), pp. 479-484, 1983.
- [14] R. H. Bamberger, *The Directional Filter Bank: A Multirate Multidimensional Filter Bank for the Directional Decomposition of Images*, Ph.D. thesis, School of Electrical Engineering, Georgia Tech, December, 1990.
- [15] D. B. Harris, *Design and Implementation of Rational 2-D Digital Filters*, Ph.D. thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, November, 1979.
- [16] S. Marcelja, "Mathematical description of the responses of simple cornea cells," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 70, pp. 1297-1300, 1980.
- [17] Yim K. Lee, *Nonlinear Image Processing and Pattern Analysis by Rotating Kernel Transformation and Optical Fourier Transform*, Ph.D. Dissertation, Georgia Tech, 1991.
- [18] Yim K. Lee and William T. Rhodes, "Feature detection and enhancement by a rotating kernel min-max transformation," in *Hybrid Image & Signal Processing II, Proc. SPIE 1297*, pp. 154-159 (1990).
- [19] Yim K. Lee and William T. Rhodes, "Nonlinear image processing by a rotating kernel transformation," *Opt. Lett.*, Vol. 15, pp. 1383-1385, 1990.
- [20] I. Glaser, "Incoherent information processing," in *Progress in Optics*, XXIV (E. Wolf, ed.), North-Holland, 1987.
- [21] W. T. Rhodes and A. A. Sawchuk, "Incoherent optical processing," in *Optical Information Processing* (S. H. Lee, ed.), New York, NY Springer-



- Verlag, 1987.
- [22] Joseph W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, New York, NY: McGraw-Hill 1968.
- [23] Wai-Hon Lee, "Computer-generated holograms: techniques and applications" in *Progress in Optics*, XVI (E. Wolf, ed.), North-Holland, 1978.
- [24] Yim K. Lee and William T. Rhodes, "Scale- and rotation-invariant pattern recognition by a rotating kernel min-max transformation," in *Proc. SPIE 1347*, pp. 146-155, 1990.
- [25] Yim K. Lee and William T. Rhodes, "Edge detection and enhancement by a rotating kernel transformation," in *Technical Digest WL6 (90 OSA Annual Meeting)*, Optical Society of America, November, 1990.

---

著 者 紹 介



李 林 杰(正會員)

1982年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업(학사). 미국 Georgia Institute of Technology 전기과 졸업(석사) 1991年 6月 (박사) 1991年 Georgia Tech 전기과 및 Georgia Tech Research Center에서 연구원으로서 광정보처리 분야에서 연구활동. 1991年 12月 이후 한국과학기술연구원 광전자 연구실에서 연구활동(선임연구원). 주관심분야는 광영상 및 신호처리, 패턴인식, 광컴퓨팅, 광위상공액(optical phase conjugation)을 이용한 정보처리, 광피이버 신호처리, 디지털영상 및 신호처리 등임