

가상 표면 인식을 위한 신경회로망 모델

정은화[†] · 홍경호^{††} · 김옥현^{†††}

요 약

인간의 시각계는 가상 윤곽(Illusory Contours)을 인식한다. 가상 윤곽이란 물리적으로는 윤곽이 없는 곳에서 주변의 패턴의 영향에 의해 윤곽이 있는 것처럼 느끼는 현상으로서, 이와 같은 현상은 물체 인식에 있어서 일부가 숨어있는 물체를 그 주위의 정보를 이용해서 보충하면서 인식해 가는 능력과 관계가 있다. 본 논문은 가상 윤곽을 인식하기 위한 것으로, 가상 윤곽에서 추출된 유도 자극으로부터 가상표면을 생성하는 신경회로망 모델을 제안하고 실험을 통해 성능을 확인한다.

A Neural Network Model for the Perception of Illusory Surfaces

Eun Hwa Jeong[†] · Keong Ho Hong^{††} · Wook Hyun Kim^{†††}

ABSTRACT

Human observers perceive a contour where no line or edge is given, such as the border between gratings of thin lines offset by half a cycle. Illusory contours occur in a wide variety of circumstances in nature. A common factor in all such figures is the perception of a surface or contour occluding part of a background, i.e. illusory contours are always accompanied by illusory surfaces. Some examples about these kinds of figures are given by Kanizsa's triangle or square. In this paper, we proposed a neural network model for forming(extracting) the illusory surfaces, based on the mechanism of feature extraction found in a mammals' visual pathway. It will be shown that the model can extract the illusory surfaces from illusory contours successfully.

1. 서 론

1904년에 슈만[1]이 처음으로 가상 윤곽 그림(illusory contour figure)을 제시했다. 이런 종류의 그림은 후에, Kanizsa[2]가 새롭고, 보다 강력하면서도 다양한 그림을 생성함으로써 다시 주의를 끌게 되었다. 가상 윤곽이란 물리적으로는 윤곽이 없는 곳에, 주변의 패턴의 영향에 의해 윤곽이 있는 것처럼 느끼는 현상으로서, 이와 같은 현상은 물체 인식 등에 있어

서 일부가 숨어있는 물체를 그 주위의 정보를 이용해서 보충하면서 인식해 가는 능력과 관계가 있다. 가상 윤곽의 예를 (그림 1)에 나타낸다. 이런 종류의 그림들은 종종 "가상 윤곽"(illusory contours), "주관적 윤곽"(subjective contours) 그리고 "변칙 윤곽"(anomalous contours)으로 부른다[3]. (그림 1(a))와 같은 가상 윤곽들(illusory contours)에 대한 논리적인 이론은 하나의 특정 형태의 깊이 계층이 항상 나타난다. 가상인 표면(illusory surface)의 출현으로 말미암아, 유도하는 요소들은, 그들의 앞에 놓인 윤곽(그림)을 완성시키는 경향이 있다. 여기서 유도자들(inducers)은 항상 관찰자로부터 더 멀리 떨어져 있는 것처럼 보이고, 가상인 윤곽을 갖는 그림은 더 가까이 존재하는

† 정 회 원: 천안대학교 컴퓨터학과

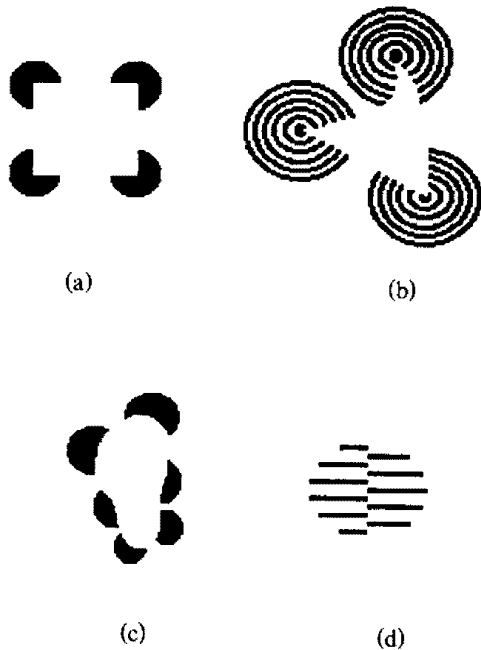
†† 정 회 원: 협성대학교 경영정보학과

††† 정 회 원: 영남대학교 컴퓨터공학과

논문접수: 1997년 2월 24일, 심사완료: 1997년 11월 6일

것처럼 보인다. (그림 1(b))에서는 뒤틀린 삼각형이 둥근 원형의 배경 위에 놓여 있는 것으로 인식되며, (그림 1(c))에서는 가상 윤곽을 형성하는 발자국 형태의 곡선을 가진 표면이 보이며, (그림 1(d))에서는 가상의 원과 직선의 경계가 지각된다.

(그림 1)과 같은 형태의 패턴에서 포유류의 시각계가 가상 윤곽을 인식하는 것은 생리심리학적인 실험으로 이미 밝혀졌다[4-6]. 그러나 이들 사이의 관계를 규명한다는 것은 여전히 문제점으로 남아있다.



(그림 1) 가상 윤곽들의 여러가지 예들. (a) Kanizsa 사각형, (b) 왜곡된 삼각형, (c) 발자국, (d) 중앙의 수직선과 주변의 원, 그러나 경계는 명확하지 않다.

(Fig. 1) Some examples of illusory contours. The square in (a), the distorted triangle in (b), the foot in (c), the vertical boundary and circle in (d) are all defined by boundaries that are not made explicit.

기존의 가상 윤곽에 관한 연구로는 Ullman[7], Heitger & Von der Heydt[8], Grossberg[9][10], Guy & Medioni[11] 등에 의해 가상 윤곽의 형성에 관한 여러가지 계산 모델들이 제안되었다. Ullman[7]은 주어진 유도 부분들에 대해 연속성(continuity), 동위성(isotr-

opy), 국부화(locality), 곡률의 최소화(minimization of curvature) 등을 수단으로 가상 윤곽들의 형태에 대한 모델을 기술했다. Heitger & Von der Heydt[8]는 폐쇄 메카니즘에 근거를 하여 가상 윤곽들을 유도하는 조각들을 추출하는 메카니즘들을 제안했다. Grossberg [9][10]는 경계윤곽시스템(BCD: Boundary Contour System)이 계층 지향 필터로부터 라인의 끝들(line endings)에 수직한 불연속 반응들을 얻는 것에 착안한 메카니즘을 제안한다. 그것은 가상 윤곽을 형성하기 위해 상호-경쟁적인 피드백(cooperative-competitive feedback)과 함께 상호 동작한다. Guy & Medioni[11]는 화상들 상의 각 점들에 확장 필드의 개념에 근거를 둔 모델을 제시했다. 또한 최근의 연구로는, Geiger 등[28]과 Paul 등[29]의 연구가 있다. Geiger 등의 연구는 Bayesian 모델을 사용하여 깊이 정보를 포함하는 가상 윤곽(가상 표면)을 생성하고 있다. 그들의 연구에서는 가상 윤곽을 형성하기 위해 국소적인 정보를 확률적인 방법에 의해 확산하는 방법을 사용하는데 이것은 주어진 입력 정보에 의해 실제와는 전혀 다른 형태의 가상 윤곽을 형성한다는 결점을 가진다. Paul 등의 연구에서는 MRF(Markov Random Field)기법을 사용하고 있는데 그들의 연구에서는 결과로서 주어진 가상 윤곽의 형태가 불연속적인 선의 형태로 경계 윤곽만을 나타낸다.

한편, 이러한 인간의 정보처리 메카니즘에 관한 문제를 해결하기 위해, 생리학이나 심리학의 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 인간의 정보 처리 메카니즘은 기존의 정보처리 장치에 비해 우수한 능력을 가진 시스템이라는 것이 밝혀져, 기존의 정보처리 장치로는 풀기가 어려운 복잡하고 애매한 패턴들에 대한 인식이나 지식 처리의 분야나 정보의 병렬 처리 문제를 다루는데 이용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 생물의 시각 신경계가 가지는 여러가지 기능들을 추상화한 모델들이 생리심리학적 연구로 많이 제시되었다[5, 6, 12-15].

본 논문에서는 기존의 계산 모델들이 제안하는 연구와 달리, 생물의 시각 신경계를 이용하여 가상 표면을 인식하는 신경회로망 모델을 구성한다. 여기서 사용될 신경회로망 모델은 시각 정보 처리 메카니즘을 다룬 Hubel과 Wiesel에 의해 제안된 계층가설을 참조하여 구성한 것이다[5, 6, 12-15].

2. 시각경로에서의 특징 추출 메카니즘

인간의 시각 정보 전달 경로에서는, 빛을 매체로 하여 외부로부터 들어온 정보가 각막, 안방수, 수정체, 초자체를 통과하여 망막(retina)에 2차원 화상으로 투영된다. 망막은 아주 복잡한 다층 구조로 되어 있으며, 망막내에는 추상체(cone)와 간상체(rod)등의 시세포(visual cell)로 불리는 광수용기(photoreceptor)에 의해 빛 신호로부터 전기 펄스 신호로 변환되어, 수평세포(horizontal cell), 쌍극세포(bipolar cell), 아마클린세포(amacrine cell)등을 경유하여 망막의 출력세포인 신경절 세포(ganglion cell)로 전달된다. 시세포는 망막상의 아주 작은 영역의 빛의 강도를 검출하며, 신경절 세포는 망막상의 국소적인 영역에 있어서의 빛의 콘트라스트를 검출하고 있다. 좌우 양안의 망막에서 나온 신경절 세포의 출력은 일부의 시신경 교차(optic chiasma)를 거쳐 간뇌의 외측슬상체(lateral geniculate body: LGB)에 도달해 시냅스를 형성한다. 외측슬상체에는 시색섬유와 시냅스 결합해서 대뇌 피질에 전달하는 중계세포가 존재한다[5, 6, 12-15].

시각계에 있어서 하나의 세포 반응은 그 세포에 붙어있는 다수의 입력 시냅스를 통해, 많은 입력 정보를 받아 어떤 처리를 행한 후, 출력을 다수의 다른 세포로 전달한다. 이와 같이 하나의 세포 반응에 영향을 주는 망막상의 영역을 수용영역(receptive field)이라 부른다. 망막의 신경절 세포에는 여러가지 크기의 수용영역이 존재한다. 즉, 망막의 중심와(fovea) 부근에 있는 세포는 작은 수용영역을 가지며, 주변으로 갈수록 수용영역의 크기가 커진다. 수용영역의 크기에 따라 반응도 달라지나, 기본적인 신경절 세포의 수용영역은 on-중심형 세포와 off-중심형 세포가 존재하는 데, 중심과 주변이 상호 억제하고 있다. 망막에 있어서의 주된 처리는 강도(intensity) 변화를 검출하는 것이다[5, 6, 12-15].

망막의 신경절 세포의 출력은 시신경을 통해 외측슬상체를 거쳐 시각영역(visual area)에 전달된다. 시각 영역은 대뇌반구의 후부에 위치하고 있다. 또한 수용영역이 동심원형을 갖는 망막이나 외측슬상체의 신경세포와는 달리, 대뇌 피질의 신경세포는 여러가지 형태와 성질을 가진 수용영역이 존재한다. 시각영역에는 특정한 기울기를 가진 직선이나 윤곽선에 반

응하는 세포를 비롯하여 여러 종류의 특징에 반응하는 세포가 존재한다고 알려져 있다[5, 6].

Hubel과 Wiesel은 고양이나 원숭이의 시각 영역(V1영역과 V2영역) 신경세포의 수용영역의 성질을 조사하였다. 그리고 이들 세포의 수용영역 성질에 근거하여 단순형 세포(simple cell), 복잡형 세포(complex cell), 초복잡형 세포(hypercomplex cell)등으로 분류하고, 이들 세포 상호간에는 망막 신경절 세포→외측슬상체→단순형 세포→복잡형 세포→초복잡형 세포라고 하는 계층적 구조가 존재한다는 계층가설을 제창했다[5, 6, 12-15].

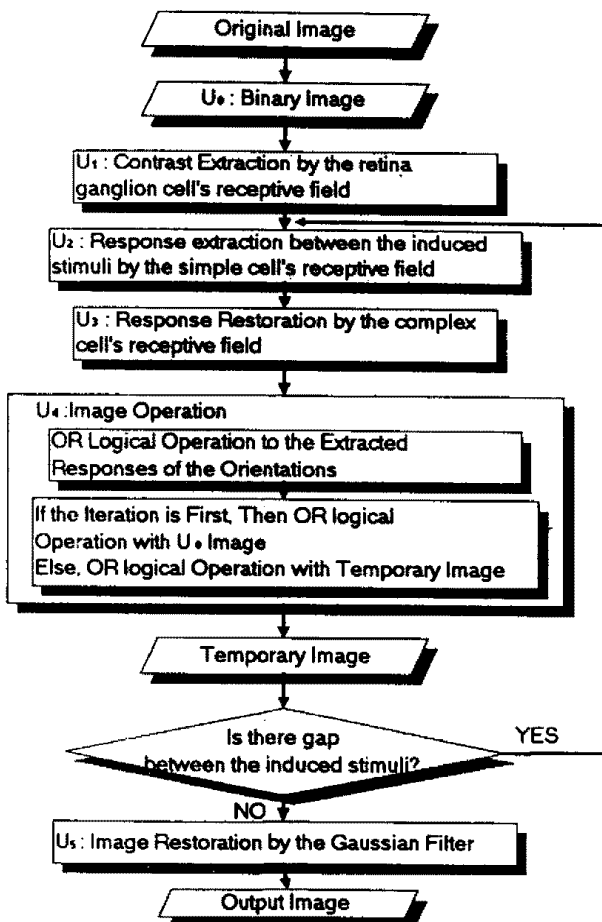
최근에는 Hubel과 Wiesel의 초기 연구 결과를 수정하려는 아이디어도 많이 나오고 있다[14, 17-22]. 예를 들면, Hubel-Wiesel의 계층가설에 의하면, 복잡형 세포는 단순형 세포로부터만 입력을 받는 것으로 되어 있지만, 실제로는 단순형 세포뿐만 아니라, 외측슬상체의 세포로부터도 직접 흥분성 시냅스 결합을 받고 있다는 것이 밝혀졌다[17-21]. 또 단순형 세포에서 복잡형 세포로의 결합은, 흥분성 결합이 아닌 억제성 결합도 있다는 보고도 있다[22].

본 논문에서 사용될 신경회로망 모델은 Hubel과 Wiesel이 제안한 계층 가설을 참조로 하여 구성한 것으로, Hubel과 Wiesel의 계층 가설 중 초복잡형 세포를 제외하고 망막에서 복잡형 세포까지의 경로를 모델링 하여 사용하고, 심리적 경험적 측면을 고려하여 Hubel과 Wiesel의 계층 가설을 수정하여 출력을 다시 단순형 세포로 역전달시키는 경로를 갖도록 구성한 것이다.

3. 가상 윤곽

가상 윤곽을 인식한다는 것은 인간의 시각계에서 일어나는 시각정보 처리 경로를 통해 발생하는 인지 현상중의 하나이다. 가상 윤곽의 대표적인 형태는 Kanizsa 삼각형인데 이런 형태의 패턴에서 나타나는 현상은 주변 패턴(유도자)들에 의해 형성된 가상 윤곽 그림(유도된 그림)은 배경이 되는 주변 패턴들 위에 놓여 있는 것처럼 보인다. 이때 가상 윤곽 그림들은 배경의 주변 패턴보다 더 가까이 존재하는 것처럼 보인다. 이와 같이 유도하는 요소(배경의 주변 패턴)들이 유도된 그림(가상 윤곽 그림)보다 공간적으로

더 멀리 존재하는 것처럼 보이며, 유도된 가상 윤곽 그림이 상대적으로 배경의 주변패턴보다 가까이 존재하는 것처럼 보이는 형태를 깊이정보를 포함하는 가상 윤곽이라 한다. 이때 깊이정보를 포함하는 가상 윤곽 그림들은 배경 위에 놓인 형태로 하나의 표면을 이루고 있는 것으로도 볼 수 있으므로, 이를 가상 표면(illusory surface)이라고도 한다.



(그림 2) 유도 자극으로부터 가상 표면 추출 시스템.
(Fig. 2) The system for extracting the illusory surface from the induced stimuli.

3.1 가상 표면 인식

가상 윤곽을 인식하기 위해서는 먼저 유도 자극점들을 추출한 후, 깊이 계층과 함께 가상 윤곽으로 주어지는 가상 표면을 인식한다. 우리는 이전 연구에서 가상 윤곽 인식을 위한 유도 자극점들을 추출하는 방법을 살펴보았다[16]. 여기서는 가상 윤곽으로 보이는 가상 표면을 인식하기 위해 이전의 연구 결과인 가상

윤곽 인식을 위한 유도 자극점들을 원 화상으로 사용한다.

(그림 2)는 유도 자극점들로부터 가상 표면을 인식하는 시스템이다. 가상 윤곽을 위해 추출된 유도 자극으로부터 가상 표면을 인식하는 방법은 주어진 유도 자극 화상을 망막 신경절 세포에 의해 윤곽선을 검출한 후 시각영역에 존재하는 단순형 세포에 의해 각 방위별로 유도 자극사이의 반응을 추출한다. 전 단계에서 흐려지거나 손상된 반응을 복원하기 위해 복잡형 세포에 의한 처리를 수행한다. 그리고 각 방위별로 추출된 반응을 OR 논리연산한 후 이를 다시 원 화상과 OR 논리연산을 행한다. 이것은 각 방위 별로 추출된 반응들을 원 화상과 결합하는 처리이며, 이것을 중간 결과 화상한다. 중간 결과 화상에서 나타난 유도 자극들 사이에 공백이 사라질 때까지, 단순형 세포에 의한 처리, 복잡형 세포에 의한 처리, 그리고 이미지 연산을 통한 이미지 결합을 수행함으로써 원하는 가상 표면을 추출할 수 있다. 이것은 시각 경로에서 정보처리 단계들을 특징 추출한 것으로, Hubel과 Wiesel의 계층 가설 중 초복잡형 세포를 제외하고 망막에서 복잡형 세포까지의 경로를 모델링 하여 사용하고, 심리적 경험적 측면을 고려하여 Hubel과 Wiesel의 계층 가설을 수정하여 출력 다시 단순형 세포로 역전달시키는 경로를 갖도록 구성한 것이다.

가상 표면을 인식하는 각 단계별 처리는 다음과 같다.

(1) 망막 신경절 세포에 의한 윤곽 검출

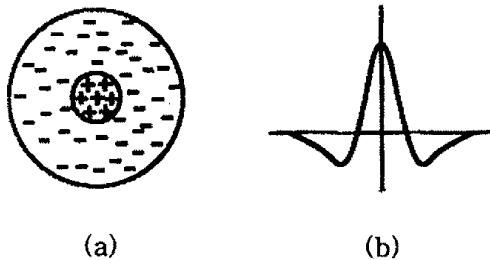
첫 번째 단계 U1층에서는 망막에 있어서의 주된 처리로 강도(intensity) 변화를 검출한다.

실험에서 사용된 망막 신경절 세포는 (그림 3)에 나타난 바와 같이 on-중심형 세포로서, 마스크(mask)는 DOG(Difference of two Gaussians) 함수를 사용한다. 만약 중심으로부터의 거리를 r , 흥분성 영역과 억제성 영역의 표준편차를 각각 σ_e , σ_i 라고 하면, 동심원형의 DOG 함수는 다음의 식으로 주어진다.

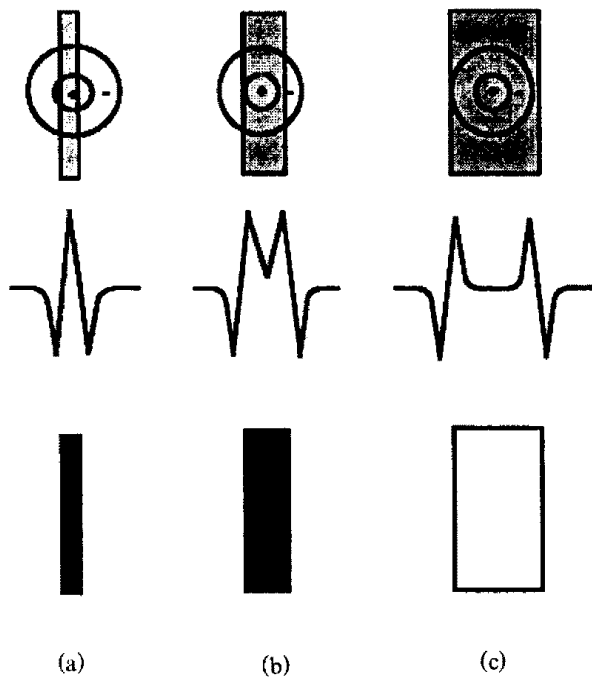
$$DOG(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_e^2} e^{-r^2/2\sigma_e^2} - \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} e^{-r^2/2\sigma_i^2} \quad (1)$$

여기서 x, y 는 마스크의 크기를 나타내며, 2개의 가우스 함수의 표준 편차의 비가 $\sigma_i/\sigma_e = 1.6$ 일 때 라플라시안 가우시안 필터(Laplacian Gaussian Filter)에

가장 근접한 최적의 필터가 된다. (그림 4)는 DOG 마스크의 크기와 자극 패턴의 크기의 상대적인 대소관계에 따라 다른 출력 결과를 나타낸다. (그림 4(a)), (그림 4(b))는 DOG 마스크의 on-영역이 추출하고자 하는 자극 패턴보다 크거나 같은 경우로 이 때는 추출하고자 하는 자극 패턴의 형태가 그대로 출력 결과가 된다. 그러나 (그림 4(c))와 같은 경우에는 윤곽선이 추출된다. 본 실험에서 사용되는 유도 자극들은 도트 자극 정도에 해당하므로, 망막에 있어서의 주된 처리인 강도(intensity) 변화를 검출한 후의 결과도 원



(그림 3) 망막 신경절 세포의 수용영역과 출력특성
(Fig. 3) Retinal ganglion cell's receptive field and filtered output profile



(그림 4) DOG 마스크의 크기와 출력간의 관계
(Fig. 4) Relationship between mask size and filtered output profile

래의 유도 자극들과 동일하다. 그러므로 실험에서 사용될 DOG 마스크의 on-영역의 크기는 적어도 유도 자극들의 크기와 같게 주어져야 한다. 본 실험에서 이 단계의 처리 결과는 주어진 화상의 윤곽(contrast) 검출에 해당한다.

이 계층(U_1)의 출력 $U_1(x, y)$ 은 식 (2)와 같다.

$$U_1(x, y) = | \int \int_{A_1} DOG(\xi, \eta) \cdot U_0(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta - \theta_1 | \quad (2)$$

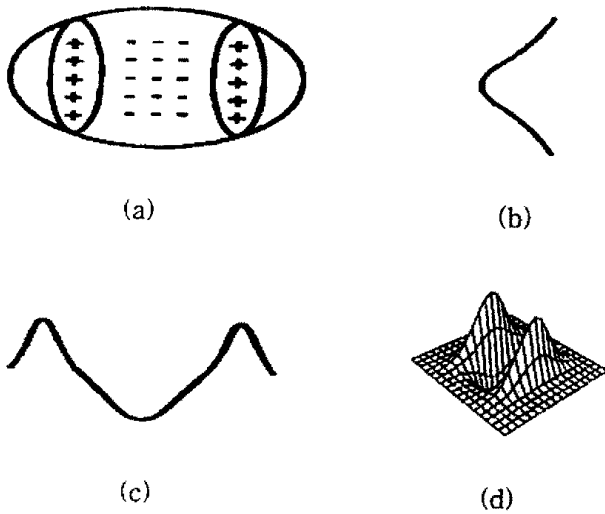
여기서 $DOG(\xi, \eta)$ 은 식 (1)과 같으며, θ_1 은 신경절 세포의 발화임계치이며, $| \cdot |$ 은 스텝 함수이다. 적분 영역 A_1 은 1개의 세포에 대한 결합 분포의 범위, 즉 수용영역의 크기를 나타낸다.

(2) 단순형 세포에 의한 유도 자극들 간의 반응 추출

두 번째 단계 U_2 층에서 사용되는 단순형 세포의 특징은, 수용영역 내의 흥분성의 on-영역에 자극이 주어지면 발화 빈도가 증가하고, 억제성의 off-영역에 자극이 주어지면 발화는 억제된다. 그러나 양쪽의 영역에 동시에 자극을 주면 양자의 효과는 서로 상쇄되어, 수용영역 전체를 덮는 정도의 빛 자극에 대해서는 거의 반응하지 않는다. 따라서, 자극 패턴의 형태나 위치가 수용영역의 흥분성 영역에 꼭 일치하는 경우에 가장 강한 반응을 나타낸다. 그래서 이와 같은 세포는 특정의 위치에 존재하는 특정 방위를 가진 직선을 추출하는 작용을 하는 것으로 추정된다. 즉, 단순형 세포는 명암의 경계나 선이 시야 내의 어느 위치에 있고 어떠한 방위를 가지고 있는가를 검출하는데 사용된다.

단순형 세포는 여러 가지 형태의 수용영역을 보인다. 이 단계에서 사용되는 단순형 세포는 직선 검출과는 달리 실험에서 주어진 유도 자극들이 도트 자극과 크기가 비슷한 정도이므로, 특정 방위의 직선 형태를 추출한다기 보다는 특정한 방위(위치)를 가진 특정의 두 자극이 주어질 때에만 나타나는 반응을 추출하는데 목적이 있다. 여기는 사용되는 단순형 세포의 수용영역과 이를 근사시킨 공간 필터는 (그림 5)에 주어진다.

단순형 세포의 반응으로 사용될 수용영역의 감도 분포는 다음과 같다.



(그림 5) 단순형 세포의 수용영역과 공간특성 (a)수용영역 (b)y축:가우스함수 (c)x축:3개의 가우스 함수의 조합 (d) 공간필터의 3차원 공간특성
(Fig. 5) Simple cell's receptive field and spatial filter profile (a) receptive field (b) y-axis: gaussian function (c) x-axis: composition of 3 gaussian function (d) spatial profile of simple cell filter

$$G(\sigma, x) = e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

$$S(x, y) = (G(\sigma_1, x-l) - G(\sigma_2, x) + G(\sigma_1, x+l)) \cdot G(\sigma_{en}, y) \quad (4)$$

$$S_\phi(x, y) = S(x\cos\phi - y\sin\phi, x\sin\phi + y\cos\phi) \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\pi}{8} \times d \quad [rad] \quad (d=0, 1, 2, \dots, 7) \quad (6)$$

여기서, σ_1, σ_2 는 각각 흥분성 영역과 억제성 영역을 규정하는 파라미터이고, σ_{en} 은 필터의 최적 방위의 민감도(sensitivity)를 나타낸 것이고, ϕ 는 최적 방위(perferred orientation 또는 optimal orientation)를 나타낸다.

수용영역의 최적방위가 α 인 단순형 세포의 출력 $U_{2,\alpha}(x, y)$ 은 식 (7)과 같다.

$$U_{2,\alpha}(x, y) = | \int \int_{A_1} S_\alpha(\xi, \eta) \cdot U_1(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta - \theta_2 | \quad (7)$$

여기서 θ_2 은 단순형 세포의 발화임계치이며, 적분영역 A_2 은 1개의 세포에 대한 결합 분포의 범위, 즉 수용영역의 크기를 나타낸다.

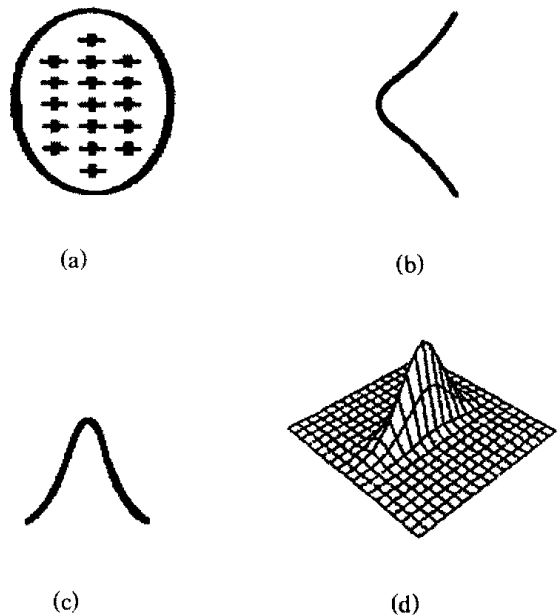
(3) 복잡형 세포에 의한 반응 복원

세번째 단계 U_3 층에서 사용되는 복잡형 세포의 특징은 수용영역의 내부가 on-, off-영역으로 구분되어 있지 않아서, 직선이 수용영역 내부에 있기만 하면, 그 위치에는 그다지 영향을 받지 않고 반응한다. 복잡형 세포는 동일한 최적 방위를 가진 복수 개의 단순형 세포로부터 흥분성 시냅스 결합을 받고, 이들 단순형 세포 중의 어느 쪽이든지 1개라도 반응하면 복잡형 세포는 발화한다. 이 단계에서 복잡형 세포는 단순형 세포의 처리에 의해 부분적으로 손상되거나 약한 반응을 재생하는 데 이용되며, 단순형 세포와는 달라서, 수용영역의 내부를 on-영역과 off-영역으로 구분할 수가 없다. 여기서 사용되는 복잡형 세포의 특성은 (그림 6)에 나타낸다.

복잡형 세포의 수용영역의 감도분포는 다음과 같이 정의한다.

$$C(x, y) = e^{-x^2/2\sigma^2} \cdot e^{-y^2/2\sigma^2} \quad (8)$$

$$C_\phi(x, y) = C(x\cos\phi - y\sin\phi, x\sin\phi + y\cos\phi) \quad (9)$$



(그림 6) 복잡형 세포의 수용영역과 공간특성 (a)수용영역 (b)y축:가우스함수 (c)x축:가우스 함수의 조합 (d) 공간필터의 3차원 공간특성
(Fig. 6) Complex cell's receptive field and spatial profile (a) receptive field (b) y-axis: gaussian function (c) x-axis: gaussian function (d) spatial profile of complex cell filter

여기서, σ_e 는 흥분성 영역을 규정하는 파라미터이고, σ_{en} 은 필터의 최적 방위의 민감도(sensitivity)를 나타낸 것이다. θ 는 식(6)에 주어져 있다.

식 (9)를 사용하여 수용영역의 최적방위가 α 인 복잡형 세포의 출력 $U_{3, \alpha}(x, y)$ 은 식 (10)와 같다.

$$U_{3, \alpha}(x, y) = 1 \left[\int \int_{A_3} C_{\alpha}(\xi, \eta) \cdot U_2(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta - \theta_3 \right] \quad (10)$$

여기서 θ_3 은 복잡형 세포의 발화임계치이며, 적분 영역 A_3 은 1개의 세포에 대한 결합 분포의 범위, 즉 수용영역의 크기를 나타낸다.

(4) 이미지 연산

네번째 단계 U_4 층에서는 방위별로 추출된 자극 화상을 원 화상과 OR 논리 연산을 하여, 이것을 중간 결과 화상으로 한다. 이 계층의 출력(U_4)은 다음과 같다.

$$COM_{total}(x, y) = \sum_{\theta=1}^7 1 \left[\int \int_{A_4} C_{\theta}(\xi, \eta) \cdot U_3(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta - \theta_4 \right] \quad (11)$$

$$U_4(x, y) = [COM_{total}(x, y) \vee U_0(x, y)] \quad (12)$$

여기서 θ_4 은 임계치이며, 적분 영역 A_4 은 1개의 세포에 대한 결합 분포의 범위, 즉 수용영역의 크기를 나타낸다. $C_{\theta}(x, y)$ 은 식(9)에 주어져 있으며 기호 \vee 은 논리 OR 연산을 나타낸다.

이 단계의 출력(U_4)을 가지고 다시 두번째 단계로 역전달 시킨다.

이것은 인간의 정보처리 메카니즘에서, 과거의 경험적인 정보를 이용한다는 심리적 경험적 측면을 고려해 Hubel과 Wiesel의 계층 가설을 수정하여 출력을 한 것으로, 두번째 단계의 단순형 세포로 역전달된 도트 자극은, 두 자극간의 반응을 조사하는 단순형 세포에 의한 처리를 한다. 그리고 이것을 복잡형 세포의 처리를 수행, 그 결과를 중간결과 화상과 OR 논리 연산을 수행하여 새로운 중간 결과 화상을 생성한다. 두번째 단계로 역전달하는 횟수는, 중간 결과 화상에서 도트 자극간의 공백(gap)이 모두 제거될 때까지 수행한다. 즉, 도트 자극이 어떠한 형태로 인식되

기까지 반복 처리하도록 구성하였다.

(5) 평활화 처리

마지막 단계 U_5 층에서는 주어진 도트 자극 간의 공백이 모두 제거된 화상을, 보다 부드러운 화상으로 만들기 위한 평활화(smoothing) 처리이다. 평활화 처리를 수행하기 위해 사용된 마스크는 식(8)에서 주어진 마스크와 동일한 가우스 함수를 사용한 것이다.

수용영역의 최적방위가 α 를 가진 이 계층(U_5)의 출력 $U_5(x, y)$ 은 식 (13)와 같다.

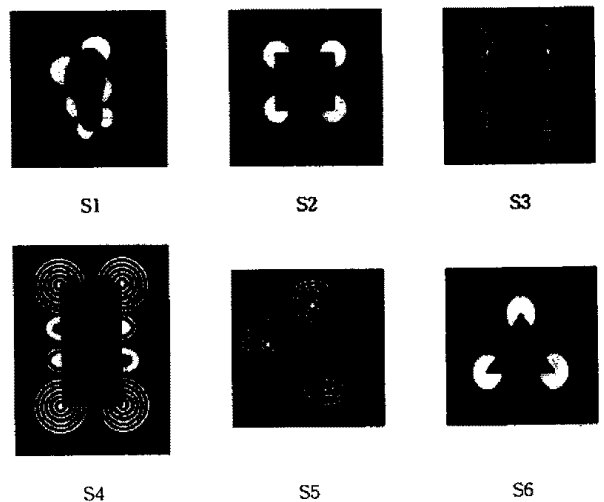
$$U_5(x, y) = 1 \left[\int \int_{A_5} C(\xi, \eta) \cdot U_4(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta - \theta_5 \right] \quad (13)$$

여기서 θ_5 은 임계치이며, 적분 영역 A_5 은 1개의 세포에 대한 결합 분포의 범위, 즉 수용영역의 크기를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 논의

가상 윤곽을 인식하기 위해서 먼저, 가상 윤곽 인식에 중요한 요인이 되는 유도 자극점들을 추출하고, 추출된 유도 자극점들로부터 가상 표면을 인식한다.

(그림 7)는 가상 윤곽(표면)을 보이는 대표적인 화상이다. 실험에서는 가상 윤곽이 형성하는 화상을 임의로 선택하여 이진 화상으로 변경하여 사용했다. 왜

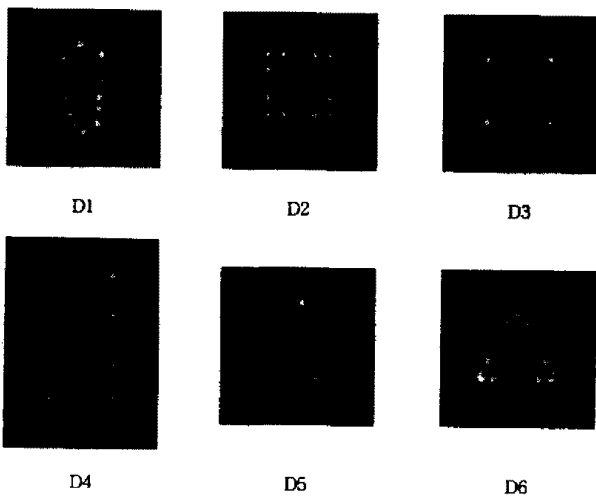


(그림 7) 실험에 사용된 원화상들. (Fig. 7) Original binary images.

나하면 가상 윤곽은 색정보를 갖지 않아도 명확하게 나타나기 때문이다. 또한 가상 표면 추출 시스템의 각 계층별 처리과정은 SUN SPARC 워크스테이션의 X-WINDOWS상에서 C언어로 모델링하였다.

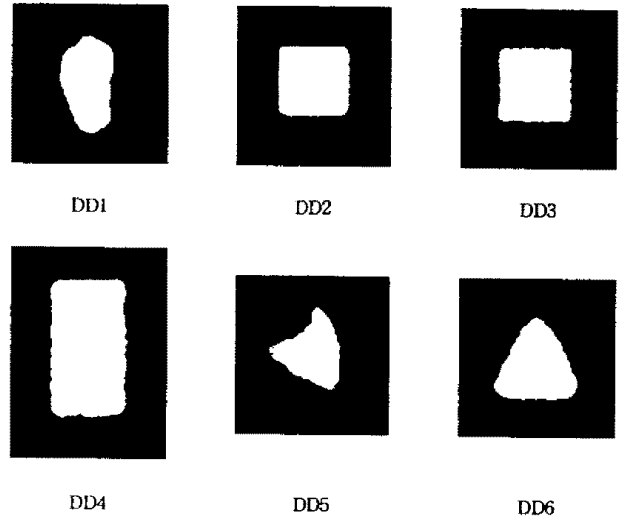
(그림 8)는 가상 윤곽의 표면을 인식하는 데 원이미지가 되는 유도자극을 추출한 화상이다.

(그림 7)의 S1 화상은 123×120 화소의 크기이고, 발자욱 형태의 가상 표면이 원형의 디스크 위에 놓여진 것처럼 인식된다. 이것으로부터 추출된 유도 자극의 결과 화상은 (그림 8)의 D1에 나타났다. (그림 7)의 S2는 119×118 화소의 크기이고, 원형의 디스크 위에 사각형이 놓여 있다. S3는 S2의 변형된 형태로 여러개의 동심원을 가진 배경위에 사각형이 놓여 있으며, 화상의 크기는 148×130 화소이다. (그림 7)의 S4는 145×180 화소의 크기이고, 여러개의 동심원과 다양한 형태의 타원형을 가진 배경 위에 직사각형이 놓여 있다. S5는 140×141 화소의 크기이고, 여러개의 동심원을 가진 배경위에 왜곡된 삼각형이 놓여 있다. S6은 111×95 화소의 크기이고, Kanizsa 삼각형과 유사한 것으로 배경이 되는 3개의 원형 디스크 위에 삼각형이 놓여 있는 것으로 인식된다. 가상 윤곽을 형성하는 여러가지 화상을 가지고 유도자극을 추출한 결과 화상은 (그림 8)에 나타났다.



(그림 8) 가상 윤곽 인식을 위한 유도 자극 추출 실험 결과 화상들.
 (Fig. 8) The result Images extracting the induced stimuli for the perception of illusory contours.

(그림 8)에 나타난 유도자극들을 가상 표면을 구성하는 새로운 원화상들이다. 이것을 가지고 (그림 2)에서 제시한 가상 표면 추출 시스템을 따라 가상 윤곽(표면)을 인식한 결과 화상들을 (그림 9)에 나타낸다.



(그림 9) 가상 표면 인식 결과 화상들.
 (Fig. 9) The result images of the perception of illusory surfaces.

(그림 10)은 (그림 2)에 제시된 각 계층별 처리과정에 따른 결과로서 가상 윤곽 인식을 위해 추출된 유도 자극들로부터 깊이 계층과 함께 주어지는 가상 표면을 인식하는 실험 결과를 나타낸다. (그림 10)에서 (i)는 가상 윤곽 인식을 위해 추출된 유도 자극들을 갖는 것으로, 이 단계에서의 원화상(U_0 층)이다. (그림 10(a))는 Kanizsa 사각형과 유사한 형태로 동심원들의 화상 위에 사각형이 놓여진 것으로 인식되는 것으로 여기서는 가상 윤곽(표면)으로 인식되는 사각형을 인식하고자 한다. (그림 10(a))는 (그림 8)의 D3 결과로서 사각형으로 인식되는 과정을 나타낸다. (그림 10(b))는 (그림 8)의 S5에 해당하는 화상으로서, 동심원상의 배경 그림 위에 왜곡된 형태를 갖는 삼각형이 놓여 있는 것으로 여기서는 왜곡된 삼각형을 인식하고자 한다.

(그림 10)에서 (ii)는 (그림 2)에 나타난 흐름도의 첫번째 단계(U_0 층)의 결과 화상이다. 이것은 식 (1), 식 (2)에 주어진 DOG 마스크에 의한 처리로 망막상의 강도 변화를 추출한 것으로 DOG 함수의 넓이와 자

극 형태 크기의 상대적인 대소관계에 따라 다른 출력을 낸다. 여기서 보여진 결과는 원 화상에 대한 윤곽선을 검출하는 것으로, (그림 10(a))나 (그림 10(b))에서는 원 화상들이 유도 자극들로 도트 크기이므로 윤곽선의 추출결과도 원 화상과 동일한 결과를 보인다.

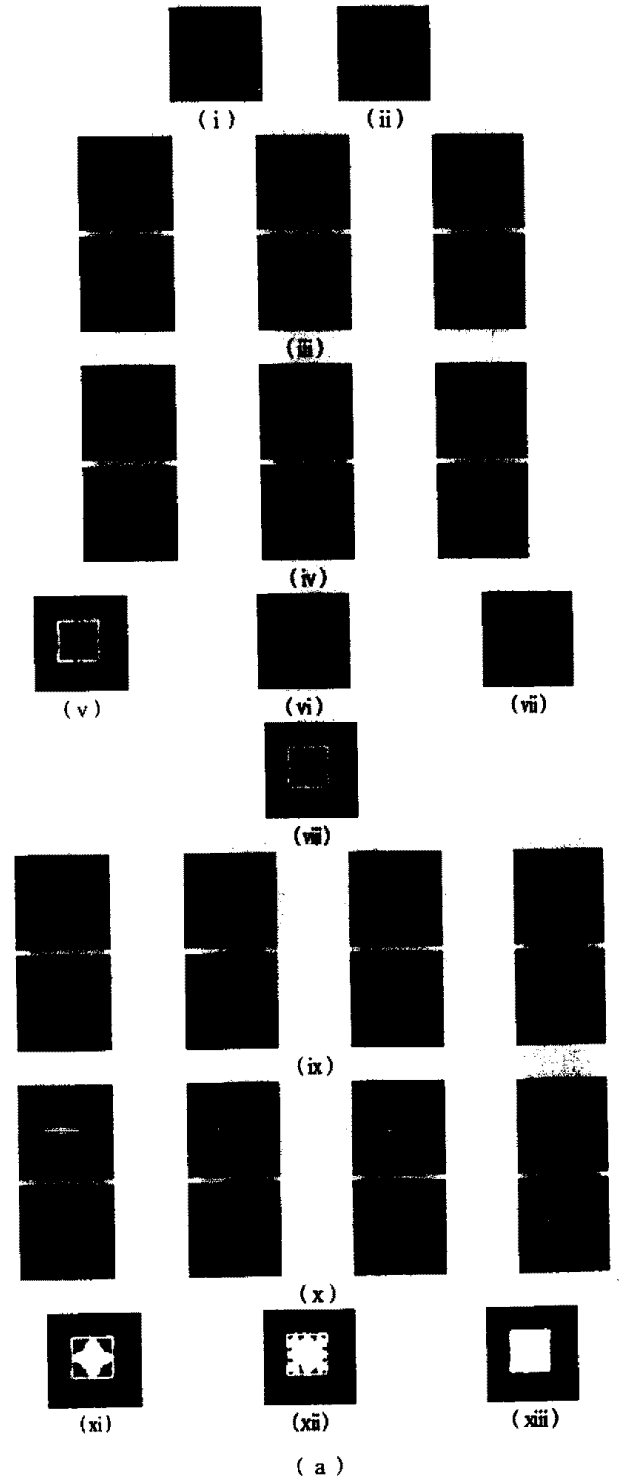
(그림 10(iii))은 두번째 단계(U_2)의 단순형 세포에 의해 나타나는 수행 결과이다. 여기서 사용한 최적방위는 8방위이고, 방위별 반응 결과를 차례로 제시했다. 단순형 세포는 자극 패턴의 형태나 위치가 수용 영역의 흥분성 영역에 꼭 일치하는 경우에는 가장 강한 반응을 나타낸다. 만약 자극 패턴의 형태나 위치가 수용 영역의 흥분성 영역에 일치(위치)하지 않으면 억제성 영역에 의해 반응은 약해진다. 그러므로 방위별로 나타난 결과는 해당방위에 따라 윤곽이 없어지거나 약해져 있음을 보인다. 사용된 마스크의 형태는 식(3), (5), (6), (7)에 주어진다.

이 단계에서 사용되는 단순형 세포는 직선 검출과는 달리 실험에서 주어진 유도 자극들이 도트 자극과 크기가 비슷한 정도이므로, 특정 방위의 직선 형태를 추출한다기 보다는 특정한 방위(위치)를 가진 특정의 두 자극이 주어질 때에만 나타나는 반응을 추출하는데 목적이 있다. (그림 10(a))에서 보여주고 있는 단순형 세포의 반응은 유도 자극이 위치한 거리와 방위에 따라 반응이 있는 것들 중에서 몇가지 예를 나타낸 것이다. (그림 10(b))에서는 일정한 거리에 위치한 유도 자극을 8방위에서 수행한 것이다.

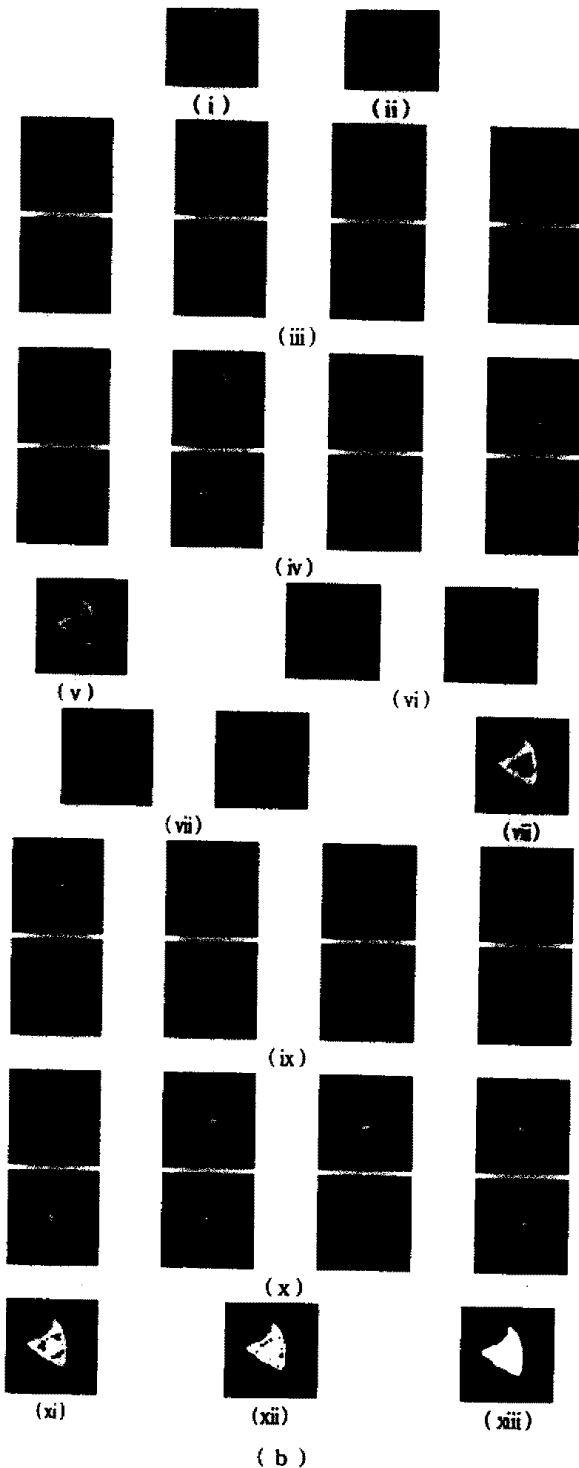
(그림 10(iv))는 세번째 단계(U_3)의 복잡형 세포에 의한 처리로, 식(8), (9), (10)에 주어진다. 이것은 전 단계의 처리에서, 주어진 패턴의 형태나 위치가 수용 영역의 흥분성 영역에 일치하지 않을 때, 억제성 영역에 의해 약해지거나 부분적으로 손상된 반응을 재생하기 위해 사용한다. 주어진 결과는 (그림 10(iii))에서 나타낸 단순형 세포의 화상을 최적방위를 가진 가우스 함수에 의해 8방위에서 수행한 것이다.

(그림 10(v))는 네번째 단계(U_4)로 방위별로 추출된 자극 화상을 원 화상과 OR 논리 연산을 하여, 이것을 첫 번째의 중간 결과 화상으로 한다. 사용된 마스크의 형태는 식(11), (12)에 나타냈다. 이 단계의 출력(U_4)을 가지고 다시 두번째 단계로 역전달 시킨다. 이것은 Hubel과 Wiesel의 계층 가설을 수정하여 출력을 한 것으로, 두번째 단계의 단순형 세포로 역전달

된 유도 자극 화상은, 두 자극간의 반응을 조사하는 단순형 세포에 의한 처리를 한다. 그리고 이것을 복잡형 세포의 처리를 수행, 그 결과를 중간 결과 화상과 OR 논리 연산을 수행하여 새로운 중간 결과 화상



(a)



(그림 10) 가상 표면(윤곽) 인식의 실험 결과들. (a) 사각형 인식에 대한 실험 결과들. (b) 왜곡된 삼각형 인식에 대한 실험 결과들. (i) 원 이미지, (ii) DOG 마스크에 의한 이미지, (iii) 단순형 세포에 의한 각 반응들의 예, (iv) 복잡형 세포에 의한 각 반응들의 예, (v) OR 논리 연산에 의한 첫 번째 중간 결과 이미지, (vi) 두 번째 반복에서 단

순형 세포에 의한 각 반응들의 예, (vii) 두 번째 반복에서 복잡형 세포에 의한 각 반응들의 예, (viii) OR 논리 연산에 의한 두 번째 중간결과 이미지, (ix) 세 번째 반복에서 단순형 세포에 의한 각 반응들의 예, (x) 세 번째 반복에서 복잡형 세포에 의한 각 반응들의 예, (xi) OR 논리 연산에 의한 세 번째 중간결과 이미지, (xii) OR 논리 연산에 의한 네 번째 중간결과 이미지, (xiii) 결과 이미지.

(Fig. 10) Experimental result images of the perception of illusory surface (contour). (a) the perception of a square. (b) the perception of a distorted triangle. (c) the perception of the vertical boundary and circle. (i) original image, (ii) image by DOG mask, (iii) each response by the simple cell, (iv) each response by the complex cell, (v) temporary image by the OR logical operation (first iteration), (vi) each response by the simple cell, (vii) each response by the complex cell, (viii) temporary image by the OR logical operation (second iteration), (ix) each response by the simple cell, (x) each response by the complex cell, (xi) temporary image by the OR logical operation (third iteration), (xii) temporary image by the OR logical operation (fourth iteration), (xiii) output image.

을 생성한다. 두 번째 단계로 역전달하는 횟수는, 중간 결과 화상에서 자극간의 공백(gap)이 모두 제거될 때까지 수행한다. 즉, 도트 자극이 어떠한 선의 형태로 인식되기까지 반복 처리하도록 구성한 것이다.

(그림 10(vi))는 첫 번째 중간 결과 화상(그림 10(v))를 가지고 다시 단순형 세포에 의한 처리를 수행한 것의 예이다. 이것은 특정 거리에 주어진 자극들이 특정방위에 의한 반응을 나타낸다. (그림 10(vii))는 단순형 세포의 처리에 의한 반응에서 윤곽이 손상된 부분을 재생하는 목적으로 사용한 것이다. (그림 10(viii))는 반복에 의한 두 번째 중간 결과 화상이다. (그림 10(ix))는 두 번째 중간 결과 화상을 가지고 단순형 세포에 의한 처리를 수행한 것으로 특정한 위치에 존재하는 자극들을 8방위에서 수행한 결과를 나타낸다. (그림 10(x))은 특정한 위치에 주어진 자극들을 8방위에서 복잡형 세포에 의한 처리를 수행한 것이다. (그림 10(xi))은 세 번째 중간 결과 화상이고, (그림 10(xii))는 네 번째 반복에 의해 주어지는 중간 결과 화상이다. (그림 10(xiii))는 최종 결과 화상이다. (그림

10(a))에서는 최종 결과 화상은 다섯 번째 반복에 의해 주어지는 중간 결과 화상이다. (그림 10(b))에서는 네 번째 반복에 의한 중간 결과 화상을 마지막 단계 (U_5)에 의한 처리를 수행한 것이다. 물론 (그림 10(b))에서도 다시 한번 반복 처리한 결과를 사용해도 좋으나 자극간의 공백이 거의 제거된 화상이므로, 보다 부드러운 화상으로 만들기 위해 평활화(smoothing) 처리를 행한 것이다. 평활화 처리를 수행하기 위해 사용된 마스크는 식(8), (13)에서 주어진 마스크와 동일한 가우스 함수를 사용한다. 물론 마지막 단계(U_5)는 생략해도 무방하다. 결과 화상을 살펴보면 (그림 10(a))에서는 가상 윤곽으로 중앙에 존재하는 사각형이 인식되고, (그림 10(b))에서는 중앙의 왜곡된 삼각형이 인식된다.

본 논문은 가상 윤곽을 인식하기 위한 것으로, 가상 윤곽에서 추출된 유도 자극들로부터 가상 표면을 인식하는 신경회로망 모델을 연구했다. 실험 데이터들을 통해, 제시된 신경회로망 모델이 깊이정보를 가지는 가상 표면을 성공적으로 추출한다는 것을 확인하였다. 이것은 시각 정보 처리경로에서 나타난 계층 가설 중 초복잡형 세포는 다루지 않고 복잡형 세포까지만을 구현하였으며, 인간의 정보처리 메카니즘에서, 과거의 경험적인 정보를 이용한다는 심리적 경험적 측면을 고려해, 단순형 세포로 역전달하는 경로를 갖도록 한 것이다.

현재까지 가상 윤곽에 관한 연구의 대부분은 주로 생리학이나 심리학 분야에서 이들의 시각현상을 보고하는 실험이다[1, 2, 7-11, 23-26]. 그 외에 가상 윤곽에 관한 연구로는 가상 윤곽들의 형성을 연속성, 곡률의 최소화, 보간에 근거한 수학적 계산에 의존하고 있다[7-11]. 최근의 연구로는, Geiger 등[28]과 Paul 등[29]의 연구가 있다. Geiger 등의 연구는 Bayesian 모델을 사용하여 깊이 정보를 포함하는 가상 윤곽(가상 표면)을 생성하고 있다. 그들의 연구에서는 가상 윤곽을 형성하기 위해 국소적인 정보를 확률적인 방법에 의해 확산하는 방법을 사용하는데 이것은 주어진 입력 정보에 의해 실제와는 전혀 다른 형태의 가상 윤곽을 형성한다는 결점을 가진다. Paul 등의 연구에서는 MRF(Markov Random Field)기법을 사용하고 있는데 그들의 연구에서는 결과로서 주어진 가상 윤곽의 형태가 불연속적인 선의 형태로 경계 윤곽만을 나타

낸다. 그러나 본 논문에서는 실험의 결과에서 보여준 바와 같이 깊이 정보를 포함하는 가상 윤곽(가상 표면)을 인식하는 것이 가능하다. 또한 Kanizsa 사각형과 유사한 형태의 깊이 정보를 포함하는 다양한 가상 윤곽 그림에 대해서도 신뢰성 있는 결과를 보인다.

5. 결 론

본 논문은 가상 윤곽을 인식하는 새로운 접근법으로, 인간의 시각 정보처리 경로에서 신경세포들의 특징을 공학적으로 모델링하여 가상 윤곽을 인식하기 위해 추출된 유도자극으로부터 가상 표면을 추출하는 신경회로망 모델을 제안한다.

가상 윤곽의 대표적인 형태는 Kanizsa 사각형인데 이런 형태의 가상 윤곽 그림들은 배경이 되는 원형의 디스크 위에 사각형의 패턴이 놓인 형태로, 깊이 정보를 포함하는 하나의 표면을 이루고 있다. 이러한 형태로 나타나는 가상 윤곽을 가상 표면이라 하는데 일반적인 가상 윤곽 그림은 모두 깊이 정보를 포함하는 가상 표면의 형태를 이루고 있지만 기존의 연구에서는 단지 2차원적인 가상 윤곽의 경계만을 결과로 나타낸다. 가상윤곽에 관한 최근의 연구인 Geiger 등의 연구는 가상 윤곽을 형성하기 위해 국소적인 정보를 확률적인 방법에 의해 확산하는 방법을 사용하는데 이것은 주어진 입력 정보에 의해 실제와는 전혀 다른 형태의 가상 윤곽을 형성한다는 결점을 가지며, Paul 등의 연구에서는 결과로서 주어진 가상 윤곽의 형태가 불연속적인 선의 형태로 경계 윤곽만을 나타낸다. 그러나 본 논문에서는 깊이 정보를 포함하는 가상 윤곽(가상 표면)을 인식할 뿐 아니라 깊이 정보를 포함하는 유사한 형태를 갖는 다양한 가상 윤곽 그림에서 주어진 가상표면을 추출하는 데 신뢰성 있는 결과를 보인다.

제안된 모델의 타당성을 검증하기 위해 실험에서 사용한 화상은 고전적 Kanizsa 사각형과 유사한 깊이 정보를 가진 여러 가지 가상 윤곽들을 대상으로 하였다. 제시한 신경회로망 모델은 가상 윤곽을 인식하기 위해 추출된 유도자극으로부터 가상 표면을 인식하는 데 성공적인 결과를 보인다. 향후 과제로는 가상 윤곽으로 보이는 원 화상에 보다 근접한 가상 표면을 추출하기 위한 처리가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] F. Shumann. "Einige beobachtungen uber die zusammenfassung von gesichtseindrucken zu einheiten". *Physiologische Studien*, 1: 1-32, 1904.
- [2] G. Kanizsa. "Organization in Vision", Praeger, New York, 1979.
- [3] Franco Purghe, Staniey Coren: "Amodal completion, depth stratification, and illusory figures: a test of Kanizsa's explanation", *Perception*, Volume 21, pages 325-335, 1995.
- [4] D. Marr, Vision, "A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information", W. H. Freedom & Company, 1982.
- [5] Hubel D. H. and Wiesel T. N. "Receptive fields binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex", *J Physiology*, pp. 106-154, 1962.
- [6] M. Livingstone and D. Hubel, "Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception", vol 240, pp. 740-749, May 6, AAAS(Science), 1988.
- [7] S. Ullman. "Filling in the gaps: The shape of subjective contours and a model for their generation". *Biological Cybernetics*, 25: 1-6, 1976.
- [8] Heitger F. and R. von der Heydt. "A Computational model of neural contour processing: Figure-ground segregation and illusory contours". *Proceedings of the IEEE*, pages 32-40, 1993.
- [9] S. Grossberg. "3-d vision and figure-ground separation by visual cortex". *Perception & Psychophysics*, 55(1): 48-120, 1994.
- [10] S. Grossberg and E. Mingolla. "Neural dynamics of perceptual grouping: textures, boundaries and emergent segmentations". *Perception & Psychophysics*, 38(2): 141-170 1985.
- [11] G. Guy and G. Medioni. "Inferring global perceptual contours from local features". In *Proc. Image Understanding Workshop DARPA*, September 1992.
- [12] Marr. D. and Hildreth. E. "A theory of edge detection", *Proc. R. Soc. Lond.* B207, 187-217, 1980.
- [13] 福島邦彦, 神經回路と情報處理, 朝倉書店, 1993.
- [14] 乾 敏郎, 視覺情報處理の基礎, サイエンス社, 1990.
- [15] 김옥현, 손진우, "신경회로망과 시각정보처리", 전자통신연구소, 전자통신동향분석, 제8권, 제3호, pp. 66-76. Oct. (1993).
- [16] 정은화, 홍경호, 김옥현, "주관적 윤곽 인식을 위한 유도 자극 추출 신경회로망", 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지시스템 종합학술대회, pp. 307-310, 1996. 10. 19.
- [17] J. Stone, B. Dreher: "Projection of X- and Y-cells of the cat's lateral geniculate nucleus to area 17 and 18 of visual cortex", *J. Neurophysiol.*, 36[3], pp. 551-567(May 1973).
- [18] K. Toyama, K. Maekawa, T. Takeda: "An analysis of neuronal circuitry for two types of visual cortical neurones classified on the basis of their responses to phasic stimuli", *Brain Res.*, 61, pp. 395-399(1973).
- [19] W. Singer, F. Tretter, M. Cynadar: "Organization of cat striate cortex: A correlation of receptive field properties with afferent and efferent connections", *J. Neurophysiol*, 38[5], pp. 1080-1098 (Sept. 1975).
- [20] K. Toyama, K. Maekawa, T. Takeda: "Convergence of retinal inputs onto visual cortical cells. I. A study of the cells monosynaptically excited from lateral geniculate body", *Brain Res.*, 137[2], pp. 207-220(1977).
- [21] K. Tanaka: "Cross-correlation analysis of geniculostriate neuronal relationships in cats", *J. Neurophysiol*, 49[6], 1303-1318(June. 1983)
- [22] K. Toyama, M. Kimura, K. Tamaka: "Organization of cat visual cortex as investigated by cross-correlation technique", *J. Neurophysiol*, 46[2], 202-214(Aug. 1972).
- [23] C. D. Gilbert: "Microcircuitry of the visual cortex", *Ann. Rev. Neurosci.*, 6, pp. 217-247, 1983.
- [24] C. D. Gilbert, T. N. Wiesel: "Intrinsic connec-

tivity and receptive field properties in visual cortex", Vision Res., 25[3], pp. 365-374, 1985.

- [25] R. von der Heydt, E. Peterhans, and G. Baumgartner. "Illusory contours and cortical neuron responses". Science Washington, 224:1260-1262, 1984.
- [26] R. von der Heydt, E. Peterhans, and G. Baumgartner. "Neuronal responses to illusory contour stimuli reveal stages of visual cortical processing". In Visual Neuroscience, pp. 343-351. Cambridge U.P, 1986.
- [27] 平井有三, 視覚と記憶の情報処理, 風館, 1987.
- [28] Davi Geiger, Krishnan Kumaran, Leonid Gurvits, "Illusory Surface and Visual Organization," Technical Report, Courant Institute, NYU, 1996.
- [29] Paul R. Cooper, Seungseok Hyun, Patrick Yuen, "A Markov Random Field Model of Subjective Contour Perception," IEEE Proc. of ICPR, Vol. 4, pp. 100-104, 1996.



정 은 화

- 1991년 영남대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)
- 1993년 영남대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
- 1997년 8월 영남대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)

1997년~현재 천안대학교 컴퓨터학과 전임강사
 관심분야: 패턴인식, 화상처리, 시각정보처리, 신경회로망 동일



홍 경 호

- 1990년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1992년 영남대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
- 1995년 8월 영남대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정 수료

1996년~현재 협성대학교 경영정보학과 전임강사
 관심분야: 신경회로망, 패턴인식, 유전자 알고리즘 동일.



김 옥 현

- 1981년 경북대 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)
- 1983년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1993년 일본 Tsukuba대학 졸업(공학박사)
- 1983년~1994년 한국전자통신연구소 선임연구원

1994년~현재 영남대 컴퓨터공학과 교수
 관심분야: 화상처리, 패턴인식