

부적 반정류 과정에 의한 결 경계 탐지

남 종 호

가톨릭대학교

결 요소의 확률분포를 근거로 결의 밝기와 대비가 동시에 변할 수 있는 결 공간에서 만들어진 결 자극(texture stimulus)을 사용하였을 경우, 결 분리는 (1) 결의 밝기 속성과 (2) 밝기 및 대비 정보가 결합된 속성에 반응하는 두 기체에 의해 처리된다고 보고되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 결 분리기체의 처리 특성을 보다 구체적으로 조사하였다. 특히 밝기와 대비 속성의 결합에 반응하는 결 분리기체가 이 두 속성을 어떻게 결합하는지를 밝히는데 목적을 두었다. 이를 위해, 밝기와 대비를 탐지하는 기체의 결 경계탐지에 각기 상반된 영향을 미치는 결 요소 크기를 변화시켜 결 분리의 탐지역을 측정하였다. 실험 결과, 밝기 및 대비 정보가 결합된 속성에 반응하는 기체는 밝기와 대비 정보를 독립적으로 처리한 후 이 정보들을 후속 처리과정에서 결합시키기보다는 밝기와 대비가 특정한 방식으로 결합된 정보를 처리하는 단일과정임이 제안되었다. 이는 결 요소의 크기 변화에 대해 기체의 민감한 축의 방향이 밝기 축과 대비 축 사이에서 변동하기보다는, 축의 방향은 고정된 상태에서 단지 탐지역만의 변화가 관찰되었기 때문이다. 이러한 단일 결 분리과정의 한 가능성으로 본 연구는 부적 반정류 과정을 제안하였다.

주제어 결 분리, 정신물리학

우리의 시각 체계는 결 단서(textural cue)를 이용하여 시각 장면에서 개별 대상들을 분리해낸다. 결 분리과정은 한 영역 내의 동질성(homogeneity)을 유지하면서, 동시에 다른 영역과의 이질성(heterogeneity)을 생성해내는 것으로 파악할 수 있다(Gorea & Papathomas, 1993). 이와 같은 결 분리과정에 관여하는 기체들과 그 속성들을 밝혀낸 많은 연구들이 있어왔다(Beck, 1982; Beck, Sutter, & Ivry, 1987; Bergen, 1991; Bergen & Landy, 1991;

Caelli, 1985; Julesz, 1975).

지난 수십 년에 걸친 결 분리 연구로 결 처리에 대한 많은 측면들이 밝혀졌다는 것은 의심할 바 없다. 그럼에도 불구하고, '결이란 무엇인가?' 라는 기본적인 질문에서조차 여러 연구들 사이에 견해차이가 있는 상황이다. 결 자극에 대한 연구가 결 자극을 어떤 속성으로 정의하느냐에 따라서 그 연구가 밝혀낸 결 분리에 관여하는 기체의 특성이 달라지게 된다. 예를 들면, 밝기, 색, 방위, 공간빈도, 운동방향

본 논문은 1998년도 가톨릭대학교 정착연구비에 의하여 연구되었음.

교신저자 주소: 남종호, 경기도 부천시 원미구 역곡2동 산43-1 가톨릭대학교 심리학과, 〒420-743

(e-mail: jhnam@www.cuk.ac.kr)

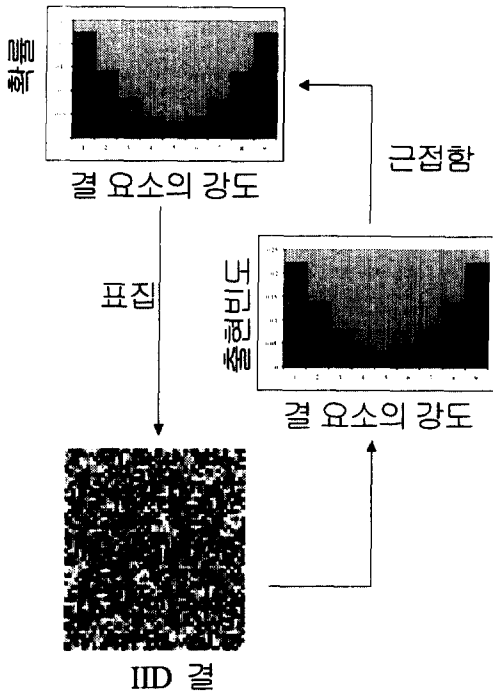


그림 1. 결 요소의 확률분포, IID 결, IID 결 요소의 출현빈도와와의 관계. 확률 분포의 특성들(평균, 분산)은 그 분포를 근거로 생성된 결 자극을 기술할 수 있다. 따라서 확률 분포를 일정하게 변형시키면 여기에 상응하는 결 자극이 만들어진다.

등, 어떤 것을 결의 속성으로 정의하느냐에 따라서 이를 탐지하는 기체의 속성 또한 서로 다르게 나타난다.

결에 대한 연구를 수리적으로 접근하는 연구자들은 인간의 시각체계가 결 자극의 수리적 속성을 추출한다고 가정한다. 이러한 맥락에서 결 자극은 통계적으로 정의(statistically define)되고 기술된다(Chubb, Econopouly, & Landy, 1994; Julesz, 1975). Chubb, Econopouly 와 Landy(1994)는 결 지각 연구에 대한 새로운 접근 방향을 제시하였다. 이들은 IID (independently, identically distributed : 독립적이며 동일하게 분포된) 결 자극을 제안하였다. IID 결 자극을 생성하기 위해서는, 미리 어

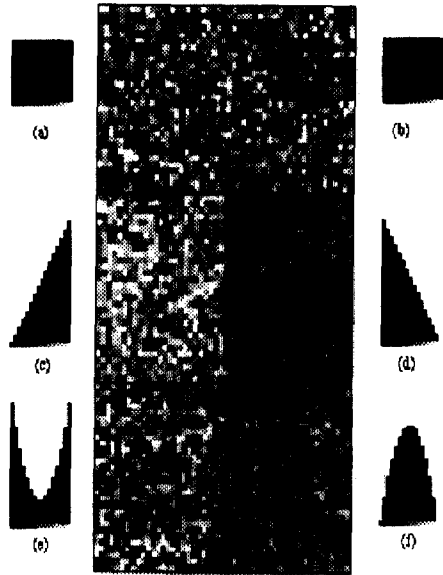


그림 2. 다양한 회색강도의 정사각형으로 구성된 IID 결. 각 결 자극을 구성하는데 사용된 결 요소 분포가 좌우 옆에 있다. (a)와 (b)는 동등 확률분포로써 두 분포가 동일하기 때문에 여기에서 생성된 두 결 자극은 경계를 드러내지 않는다. 결 자극 (c)와 (d)는 확률분포의 분산이 같지만 밝기차이로 인한 결 경계가 분리된다. (e)와 (f)는 평균이 같음에도 불구하고 결 경계가 분리되는데 이는 대비의 차이에 기인한다.

떤 확률분포를 상정하고, 결 요소를 이 확률분포에 따라 결정하게 된다. 이렇게 생성된 결 자극의 속성들은 확률분포의 특성을 이용하여 기술할 수 있다 (그림 1).

우리는 평균이 높은 확률분포를 근거로 만들어진 결을 평균이 낮은 확률분포를 근거로 만들어진 결보다 밝게 지각한다. 또한 분산이 큰 확률분포를 근거로 만들어진 결을 분산이 작은 확률분포를 근거로 만들어진 결보다 대비(contrast)가 높다고 지각한다. 따라서 결 영역의 밝기는 결 요소들의 회색밝기에 대한 확률분포의 평균에 의해서 결정되며, 또한 대비는 확률분포의 분산에 의해서 결정된다고 가

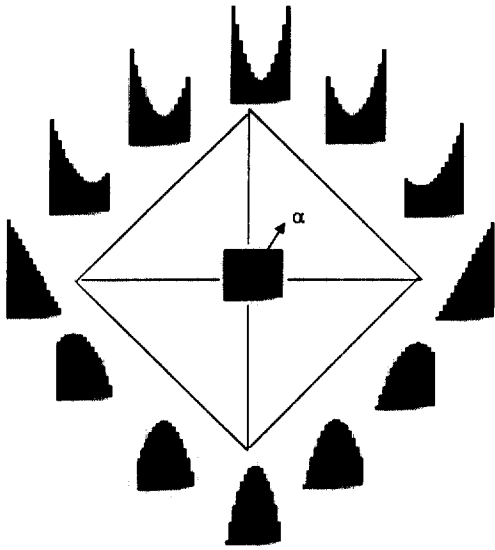


그림 3. 평균밝기와 분산이 축으로 구성된 결 공간. 원점은 동등 분포(uniform distribution)로 나타내져 있다. 세로축은 분산의 증감을, 가로축은 평균의 증감을 나타낸다. α 는 원점에서의 상대적 거리로써 외곽 마름모꼴에 도달하면 최대 값이 1이 되며, 특정 방향에 있어서 어느 정도 원점으로부터 멀어져야 결 경계가 탐지되는 결을 구성하는 확률분포가 되는지를 나타내는 역 값으로 사용된다.

정할 수 있다. 우리는 이러한 자극 중에서 수학적으로 대비를 같게 하기 위하여 분산을 같게 하고, 밝기만을 다르게 만든 결 자극의 쌍의 경계선이 어디에 있는 지는 쉽게 알아낼 수 있다. 더욱이 밝기를 같게 하고, 대비만을 다르게 했을 때에도 결 경계 탐지는 쉽게 가능하다. 이러한 예는 인간의 시각체계가 결 자극의 밝기차이를 탐지할 뿐만 아니라, 결 자극의 대비의 차이에도 민감하다는 것을 보여준다(그림 2).

IID 결 분리에서 결 요소들의 확률분포 상의 평균과 분산의 역할에 대하여 알아본 연구가 있다(남중호, 1999). 이들 연구에서는 결 요소들의 회색밝기에 값을 부여하여 확률분포들의 집합을 만든 후, 확률평균치 차원에서의 변

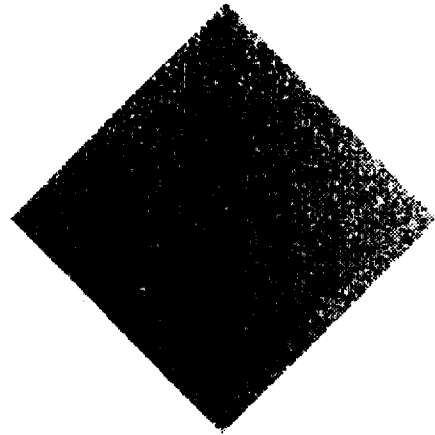


그림 4. IID 결 공간에서의 결 구성 예. 그림 3에서 보인 각 좌표의 확률 분포를 근거로 결을 보여준다 결은 위에서 아래로 결의 대비가 점차 약해지고, 결의 밝기는 우에서 좌로 점차 어두워진다.

화와 확률분산치 차원에서의 변화를 독립적으로 조정하였다. 이 확률분포를 이용하여 생성된 결 자극들은 특정한 밝기와 대비를 가지게 된다. 결의 밝기와 대비의 두 차원을 직교 배치하여 결 자극에 대한 유클리드 공간을 구성하였다(그림 3, 4). 이 공간상에서 생성된 결 자극이 어느 정도의 밝기차이가 있어야 결 분리가 일어나는지, 또한 어느 정도의 대비의 차이가 있어야 결 분리가 일어나는지를 정신물리학 실험을 통하여 연구하였다(그림 5).

이 연구(남중호, 1999)에서 가정한 모형은 다음과 같다 (그림 5). 경계를 이루고 있는 결의 평균밝기, 결의 대비, 또는 이들의 어떤 조합의 차이에 민감한 기제가 있다. 어떤 한 기제가 결 경계를 탐지하는 확률과 다른 기제가 결 경계를 탐지하는 확률은 서로 독립적이다. 두 기제 중 적어도 하나가 결 경계를 탐지하면, 결 경계가 탐지된다. 각 기제가 경계를 탐지하는 확률을 계산하는 함수로는 Weibull 함수를 사용하였다. Weibull 함수는 정신물리학 함수의 기본 형태라고 가정되는 누적 정규분포함

수(cumulative normal distribution function)와 유사한 특성을 가지고 있으며, 특히 계산적 측면에서 훨씬 간단한 형태를 지니고 있기 때문에 정신물리학 연구에서 자주 사용된다. Weibull 함수는 보통 두 개의 변수를 가지고 있다: $P=1-2^{-S\alpha^K}$, 여기서 P는 탐지 확률, S는 중심 변수, K는 기울기 변수, 그리고 α 는 자극 강도(그림 3의 α 와 같은 의미)이다. 그러나 이 모형에서 한 기제는 밝기와 대비, 그 어느 것도 아닌 둘의 어떤 조합에 민감할 가능성이 있으므로 결 공간의 방향 변수를 세 번째 변인으로 포함하였다:

$P=1-2^{-S(x \cdot \cos(\theta)+y \cdot \sin(\theta))^K}$, 여기서 P는 탐지 확률, S는 중심 변수, K는 기울기 변수, θ 는 축의 방향, 그리고 x와 y는 자극 강도를 나타내는 좌표 값으로써 실험에서 사용된 극 좌표에서 계산되어졌다. 그러므로 확률총합에 의해서 두 기제 중 적어도 하나의 기제가 결 경계를 탐지할 확률을 계산하여, 다음과 같이 두 개의 정신물리학 함수로 구성된 최종 모형이 얻어졌다:

$$P_{\text{합기}} = 1 - 2^{-S_f(x \cos(\theta_f) + y \sin(\theta_f))^K_f - S_g(x \cos(\theta_g) + y \sin(\theta_g))^K_g}$$

, 여기서 한 기제(f)의 정신물리학 함수를 구성하는 변수로써, S_f 는 중심 변수, K_f 는 기울기 변수, θ_f 는 축의 방향을 가리키고, 다른 기제(g)의 경우, S_g 는 중심 변수, K_g 는 기울기 변수, θ_g 는 축의 방향을 가리킨다. 이 모형은 우도검증에 의해 정신물리학 실험에서 얻은 자료를 잘 설명할 수 있었다(남중호, 1999).

이 연구에서 다음과 같은 것들이 시사되었다. 첫째, 밝기와 대비 두 차원으로 구성된 결 자극공간에 결 분리과정에는 두 종류의 결 처리기제가 관여하고 있다. 둘째, 밝혀진 두 개의 결 처리기제가 출력한 각각의 정보는 확률 결합(probability summation) 방식에 의해서 처리된다. 셋째, 밝혀진 두 기제 중 하나는 축의 방향이 결 공간의 가로축과 일치되어, 결 자극의 밝기차원에 대단히 민감한 것으로 밝

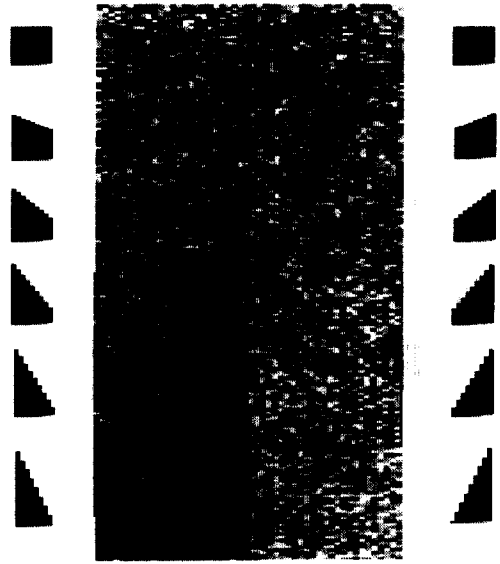


그림 5. 매개변수 α 가 가져오는 확률분포 상의 변화 예. 그림 3과 관련지어 설명하면, 동등 확률분포(uniform probability distribution)와 외곽 마름모꼴에 위치한 확률분포와의 선형조합의 비율을 α 가 결정하게된다. 여기서는 α 가 x 축 상의 원점에서 멀어질수록 (여기서는 상하방향으로 나타났음), IID 결 자극의 밝기가 어떻게 달라져 나타나는지, 그리고 이와 관련된 확률분포의 변화는 어떠한 지를 보여준다.

혀졌으나, 다른 기제는 축의 방향이 가로축이나 세로축 어디에도 일치되지 않는 방향으로 결정되어, 결의 밝기 차원과 대비 차원이 함께 결합된 결의 속성에 민감한 것으로 드러났다(그림 6).

본 연구에서는 이전 연구에서 밝힌 결 분리의 두 기제 중 결의 밝기와 대비의 조합에 민감한 기제의 특성을 밝히고자 하였다. 결의 밝기와 대비의 조합에 민감한 기제의 특성은 다음과 같은 두 가지의 가능한 과정으로 설명될 수 있다. 첫째로 결의 평균 밝기 정보와 결의 대비 정보가 각각 처리된 후 그 정보를 종합하여 처리하는 과정으로 이루어져 있을 수 있

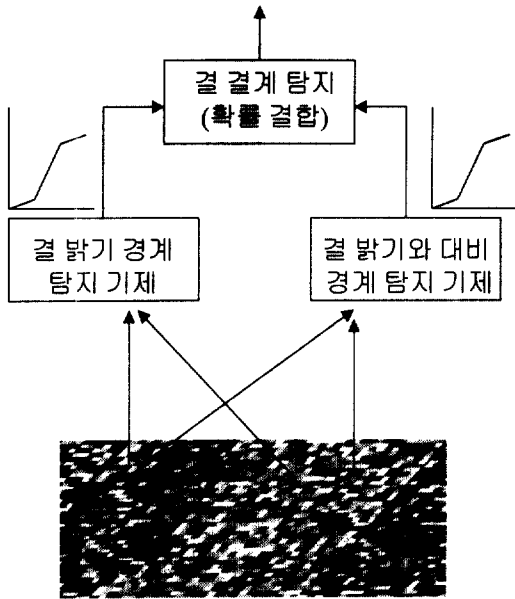


그림 6. IID 결 공간에서 결 경계선 탐지에 관여하는 두 기제와 신호 결합 방식.

다. 둘째로 밝기와 대비가 특정한 방식으로 결합된 정보만을 처리하는 단일 과정으로 이루어져 있을 수 있다. 따라서 결 밝기와 결 대비에 차별적으로 영향을 주는 조작을 도입하여, 모형의 어떤 측면이 변화되는지를 알아보려고 한다. 가능한 조작으로는 일정한 영역에서의 결 요소를 표집(sampling)하는 정도를 다르게 하는 것이다. 체계적인 변화가 예상되는 근거는 다음과 같다.

결 요소의 표집 크기는 결 요소의 시각 각도(visual angle)에 영향을 받게 된다. 예를 들면 결 자극의 평균 밝기는 결 요소의 크기가 작을수록 쉽게 드러난다. 중앙 한계 정리(central limit theorem)에 의하면 표집의 크기가 클수록 모집단의 평균의 추정치가 모집단의 평균에 근사하게 된다. 같은 원리로 결의 평균 밝기에 민감한 기제는 한번에 표집하는 결 요소의 수가 많을수록 한 영역내의 평균 밝기를 쉽게 파악하고, 영역간에 존재하는 결 요소의 밝기차이를 용이하게 탐지해낼 것이라고 예측할 수 있다.

대조적으로 결의 대비를 탐지하는 기제는 한번에 표집하는 수가 많을수록 결의 평균 밝기에 민감한 기제와는 상반된 영향을 받는다. 즉 표집의 결과로 얻어진 회색 강도가 평균에 근사하게 되므로 결 요소의 정체(여기서는 회색 강도)는 약해지게 되고 대비 정보는 상실된다.

이와 같이 결 요소의 크기에 따라 서로 다른 방향의 변화를 보일 것으로 예상된다. 그런데 이전 연구에서 밝힌 두 기제 중 한 기제는 결의 밝기 차원과 대비 차원이 결합된 결의 속성에 민감하였다. 이 기제의 경우에는 표집 크기에 따라 상반된 효과를 가져올 것으로 예상되는, 즉 상쇄(trade-off)과정을 포함하고 있을 것으로 보인다. 이 기제에서 보이는 변화양상이 두 가지 방식으로 나타날 것으로 예측된다.

첫째로 이 기제가 결의 밝기 정보와 결의 대비 정보가 각각 처리된 후 그 정보를 종합하여 처리하는 과정으로 이루어져 있는 경우, 탐지하는 공간상의 축 방향이 결 요소의 크기에 따라 체계적으로 변화할 가능성이 있다. 결의 밝기 차원과 대비 차원의 결합은 우선적으로 정상화(normalization)과정을 들 수 있다. 결의 밝기 차원과 대비 차원이 결합하는데 있어서, 고(高)대비와 낮은 밝기(또는 저(低)대비와 높은 밝기)가 결합되어 강한 신호를 발생시키는 것으로 파악된다. 즉, 망막상의 신호가 다음과 같은 정상화 과정(Barlow, 1965; Shapley & Enroth-Cugell, 1984)을 거친다면, 위와 같은 고(高)대비와 낮은 밝기의 결합이나 또는 저(低)대비와 높은 밝기의 결합이 강한 신호를 발생시키게 된다 :

$$I_s(x, y, t) = \frac{S(x, y, t) - \text{국소평균}_s(x, y, t)}{\text{국소평균}_s(x, y, t)}, \text{ 여기서 } I$$

는 기제에 입력되는 강도, S 는 물리적 자극 강도, 국소평균 $_s$ 는 S 주변의 자극 강도의 평균, 그리고 (x, y, t) 는 특정한 시점과 장소를 나타낸다. 그러나 이 기제는 결 요소가 작아서 각 요소의 밝기정보가 개별적으로 가용하지 않을 경우는 $S(x, y, t)$ 가 국소 평균에 가깝게 되며,

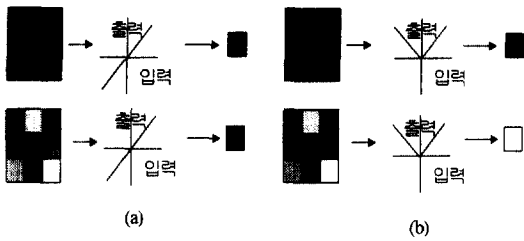


그림 7. 선형 기제(a)와 비선형 기제(b)가 한정된 공간을 점유하고 있는 두 종류의 결 자극을 처리할 경우, 각 기제들이 이 공간에 대하여 계산한 최종 출력의 예. 각 기제는 9개의 회색 강도에 대한 출력을 각각 낸 후, 각 출력의 평균 강도를 계산하여 최종 출력으로 보내게 된다. 선형 기제는 두 종류의 결 자극에 대하여, 최종적으로 같은 출력을 낸다. 반면에 비선형 기제(여기서는 전정류 기제)는 두 종류의 결 자극에 대하여 최종적으로 다른 출력을 낸다. 따라서 비선형 기제만이 두 종류의 결을 구분하는 신호를 발생할 수 있다.

결의 대비 정보는 결 분리에 전혀 도움을 줄 수가 없게 된다. 즉 축 방향이 밝기 방향과 유사하게 될 것이다. 결 요소가 큰 경우에는 이와 반대의 경향이 나타날 것으로 예측할 수 있다. 즉 축 방향이 대비 방향과 유사하게 될 것이다. 그러므로 결 요소의 크기가 커짐에 따라 이 기제의 축 방향이 밝기 방향에서 대비 방향으로 점진적으로 옮겨질 것이다. 이러한 결과는 그 특정한 기제가 두 가지 결 분리 정보를 어떤 방식으로 조합하는 경우에도 얻어질 수 있다.

둘째로 이 기제가 밝기와 대비가 특정한 방식으로 결합된 정보만을 처리하는 단일 과정으로 이루어져 있는 경우이다. 대비와 같은 이차적 결 속성을 처리하기 위해서는 어떤 종류의 비선형적 처리(nonlinear processing)가 필요한데, 기존의 연구들은 전정류(full-wave rectification) 처리과정을 선호하였다(Bergen & Landy, 1991) (그림 7). 전정류 처리과정은

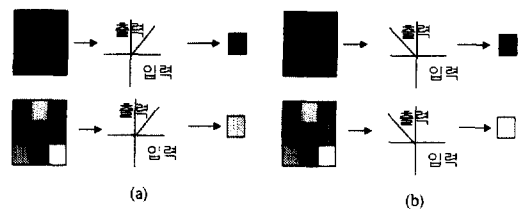


그림 8. 정적 반정류 기제(a)와 부정 반정류 기제(b)가 한정된 공간을 점유하고 있는 두 종류의 결 자극을 처리할 경우, 각 기제들이 이 공간에 대하여 계산한 최종 출력의 예. 두 반정류 기제 모두 두 종류의 결 자극에 대하여, 최종적으로 상이한 출력을 낸다.

정적 반정류 (positive half-wave rectification) 처리과정과 부정 반정류 처리과정이 가법(additive) 방식으로 상호작용 하는 형식의 모형을 만듦으로써 가능하다 (Derrington, 1990) (그림 8, 9). 여기서 두 가지 반정류 처리과정에서 출력한 신호를 같은 가중치로 전달되어 후속 과정에 동등하게 기여한다는 가정을 하고 있다. 하지만 이러한 가정을 검증하는 실험은 없었다. 그런데 Chubb 과 Nam(2000)은 결의 변산성을 판단하는 과제에서 결을 이루고 있는 요소의 회색강도 중 평균 밝기 이하의 회색강도만이 판단과정에 중요하게 역할을 하고 있음을 밝혔다. 이는 결의 변산성 판단과정에서 평균 밝기 이하의 회색강도에 대하여 강한 신호를 발생시키는 부정 반정류 기제가 주도하고 있음을 강력하게 시사하였다. 그러므로 앞에서 설명된 바 있는 남종호(1999)의 두 가지 결 분리 기제 중 결의 밝기와 대비에 동시에 민감한 기제가 부정 반정류 기제의 특성을 지니고 있을 가능성이 있다. 만일 정적 반정류 기제가 관련한다면 IID 결 공간에서 축의 방향이 고(高)대비와 높은 밝기(또는 저(低)대비와 낮은 밝기)가 결합되는 방향으로 기울어져 있게 된다. 그러나 이전 연구에서 IID 결 공간에서 축의 방향이 고(高)대비와 낮은 밝기(또는 저(低)대비와 높은 밝기)가 결합되는 방향으로 기울

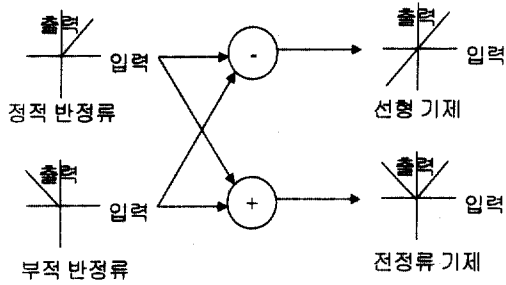


그림 9. 정적 반정류 기제와 부적 반정류 기제가 가산 또는 감산 방식으로 결합함으로써 선형 기제와 비선형 기제 (여기서는 전정류 기제)로 나타난다.

어저 있음을 보고하였으므로 정적 반정류 기제일 가능성을 배제할 수 있다. 그리고 만일 부적 반정류 기제가 결 경계 탐지에서 밝기 정보와 같은 다른 처리과정의 출력과 결합하지 않고 단독으로 출력을 낸다면, 결의 요소크기에 따라서 나타나는 변화는 탐지역에서만 있을 것이고, 축 방향은 일정하게 남아있을 것이다.

본 연구에서는 밝기와 대비의 조합에 민감한 기제의 특성에 초점을 두고, 이를 위해서 이전 연구에서 사용된 모형을 변형하여, 결의 밝기에 민감한 축의 방향을 고정하였다. 따라서 이전 연구에서 사용된 모형을 변형하여 밝기 탐지 기제의 축을 0° 로 고정시켰다. 따라서 다음과 같은 함수 형태를 가지게 되었다:

$$P_{\text{탐지}} = 1 - 2^{-S_1(x\cos(0) + y\sin(0))^{k_1} - S_2(x\cos(\theta_p) + y\sin(\theta_p))^{k_2}}$$

$$\text{, 즉 } P_{\text{탐지}} = 1 - 2^{-S_1 x^{k_1} - S_2 (x\cos(\theta_p) + y\sin(\theta_p))^{k_2}}$$

방법

피험자. 세 명이 실험에 참가하였다. 실험 참가자의 연령 분포는 24~27세 이었으며, 정상시력 또는 교정된 정상시력의 소유자였다. 실험 참가자 모두는 정신물리학 실험에 익숙하지 않은 관찰자였다. 그리고 실험 참가자는 실험참가에 대한 보수를 받았다.

자극 및 장치. 실험의 전 과정은 애플사의 파워PC 8500(Apple PowerPC 8500/180)을 사용하여 통제되었다. 결 자극은 매킨토시 모노크롬 12인치 모니터에 제시되었다. IID 결 자극을 구성하는 결 요소는 선형성(linearity)이 유지된 9개의 회색강도로 구성되었다. 선형성이 유지되는 회색강도는 별도의 절차²⁾를 사용하여 결정하고, 그 중 9개가 실험에 사용되었다. 결 요소의 회색강도는 7.96i cd/m², i = 0.1, ..., 8였다. 결 자극은 가로 50열과 세로 50줄의 결 자극요소로 구성되었다. 결 자극 요소는 세 가지 크기가 있었다. 피험자와 화면까지의 거리는 60cm를 유지하도록 한 상황에서, 제일 작은 자극조건의 경우, 결 자극을 이루는 결 요소 하나의 시각은 4.3' (1' = $\frac{1}{60}^\circ$)이었다. 그 다음 크기의 자극조건의 경우는 결 자극을

2) 회색강도의 선형성은 다음과 같은 절차로 얻어졌다. 세 개의 회색강도(L(hi), L(mid), L(lo))를 포함하는 규칙적인 결 무늬에 대한 판단을 하도록 요구한다. 세 개의 회색강도는 전체 면적에서 L(hi)와 L(lo)는 각각 25%씩 이고, L(mid)는 50%를 차지하게 된다(그림 10). 세로 줄무늬의 모양으로 분리되는 결에서만 단편은 50%의 L(mid)와 각각 25%씩의 L(hi)와 L(lo)로 이루어져 있고, 다른 단편은 각각 50%씩의 L(hi)와 L(lo)로 이루어져 있다. 이와 같은 자극화면을 충분히 먼 거리에서 관찰하게 되면, 결의 요소들은 거의 확인되지 않으며, 오로지 결의 평균밝기에 의해서만 결 분리가 일어나게 된다. L(mid)를 이러한 경계가 사라지도록 강도를 조절하고, 경계가 사라졌을 때 회색강도를 L(hi)와 L(lo)의 중간강도로 지정하게 된다. 이러한 절차를 다양한 L(hi)와 L(lo)를 사용하여, 가능한 전 회색강도에서 L(mid)을 결정했을 때, 완성된 표를 룩업표(lookup table)라고 부른다. 이 표를 완성한 후에 필요한 수만큼의 회색을 추출해서 실험에 사용하게 된다.

이루는 결 요소 하나의 시각은 8.7' 이었고, 17.4' 이었다. 각 자극의 전체 크기는 제일 작은 자극조건의 경우 3.36° 이었고, 중간 크기 조건에서는 6.7° , 그리고 가장 큰 자극조건의 경우는 13.23° 이었다. 결 자극은 시행에 따라서 가로 방향, 또는 세로 방향으로 2 주기의 격자 파형을 포함하였는데, 시각도당 각각 0.52, 0.26, 그리고 0.13 주기였다. 따라서 일정한 화면 면적을 가장 큰 자극의 경우 하나의 결 요소가 차지하고 있다면, 중간크기의 자극은 네 개, 그리고 가장 작은 자극의 경우는 열여섯 개의 요소가 차지하고 있었다.

절차. 각 시행은 다음과 같이 구성되어 있었다. 평균밝기(31.84 cd/m²)의 회색화면에 결 자극이 제시되고 250msec 후에 사라졌다. 피험자는 제시된 결 자극이 가로로 나누어져 있었는지, 세로로 나누어져 있었는지를 두 가지 대안 중 하나를 강제로 선택하게 하는 강제선택과제(2AFC: Two-alternative forced choice)에 따라 반응하였다. 반응 후에 판단이 옳았는지에 대한 피드백이 주어졌다. 반응의 정확성은 결 자극의 쌍에서 평균차이와 분산차이를 정신물리학의 계단법 (staircase method)에 따라 다음 번에 제시될 자극 쌍을 생성해내는 매개변수(그림 3의 α)로 사용되어 피험자의 수행정도에 따라 적합한 역 주변의 자극강도에 대한 관찰치를 얻을 수 있었다.

결 요소의 크기가 세 가지 종류로, 그리고 결 공간의 원점에서 방사선 방향으로 11개의 자극조건이 결정되어지고, 각 방향에 대한 역을 측정하는데 모든 조건은 무선적으로 혼합되어 제시되었다.

11개의 방사선 방향은 그림 3에서 각도로 표현될 수 있는데, 0° 에서 180° 까지 18° 씩 증가시켰다. 그러나 0° 와 180° 는 동일한 조건이므로, 중복 측정된 경우가 되었다. 각 조건 별로 300회의 시행을 포함하였다. 따라서 결 공간의 원점에서 11개 방향, 3가지 크기의 33개의 조건에 300회 시행을 하였으므로 총

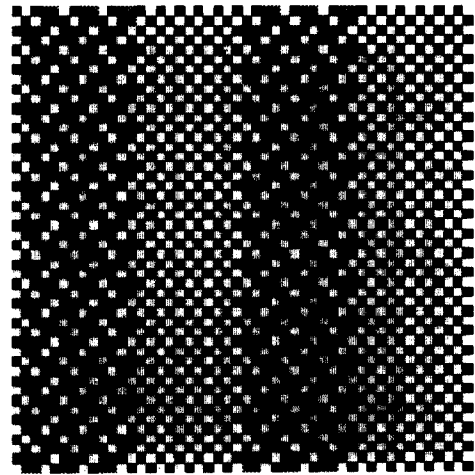


그림 10. 회색강도의 직선화에 사용된 자극형태. L_{mid} 는 L_{hi} 와 L_{low} 의 중간에 설정된다. 만일 설정이 올바르게 정해지면, 영역 전체가 동일한 영역으로 보이게 된다.

시행은 9900회가 되었다. 피험자는 9900회의 관찰을 300회의 작은 단위로 나누어 이를 한 블록으로 간주하여 수행하였다.

결과

본 실험에서는 극 좌표와 유사한 좌표를 사용하였다. 그림 3에서 설명한 바와 같이 각도는 일반 극 좌표와 같고, 원점에서의 거리(a)는 각도에 따라 다르다. 한 각도와 그 각도에서의 거리를 본 연구의 모형에서 사용될 수 있도록 직교좌표상의

$$P_{\text{타지}} = 1 - 2^{-S_f x^{K_f} - S_g (x \cos(\theta_g) + y \sin(\theta_g))^{K_g}}$$

좌표로 변환하였다. 이 모형을 사용하여 자료들이 가장 적합하게 설명되는 매개변수를 결정하였다(표 1).

세 명의 피험자들에게서 얻은 자료를 살펴보면, 축의 방향이 시각도가 커짐에 따라 체계적으로 변화하는 것처럼 보이지는 않는다. 대신에 역이 시각도와 밀접한 관련이 있음을 보이고 있다. 결의 밝기에 따른 역을 나타내는

축 1의 경우 시각도가 커짐에 따라 두 명의 피험자(KYA, PYS)는 역이 증가하고 있다. 다른 한 명의 피험자(YSJ)의 경우 4.3' 과 8.7' 의 조건에서 약간 역전되기는 하나, 17.3' 에서 역이 증가된 것을 볼 수 있다.

축 2의 방향이 결 요소의 시각도와 체계적인 결함을 보이지 않고, 그 변동성도 크지 않았다. 따라서 시각도에 따른 역의 체계적인 변화가 있는지를 알아보았다. 상이한 시각도 조건에서 얻은 자료들을 사용하여 동시에 최대 우도값을 산출해내는 축 방향을 추출하였다. 환언하면, 시각도에 따라 세 조건에서 공통적으로 사용되는 축을 적용하면서, 각 조건들에 적합한 역(S_f 와 S_g)과 경사도(K_f 와 K_g)를 변동시켰다. 세 가지 시각도에서 얻은 자료를 동시에 적용시켜서 우도 값의 총합을 최대로 만드는 모형의 매개변인들을 표 2에 제시하였다. 그리고 시각도에 따른 역의 변화를 그림 11에 나타내었다. 이 그림에서 두 가지 기제의 역이 결 요소의 크기에 따라 서로 상반되는 방향으로 변화하고 있다는 것이 분명하게 나타나고 있다.

논의

본 연구에서 관찰된 바에 따르면 결의 밝기

와 대비의 두 차원을 직교 배치하여 구성된 결 공간에서 결 분리에 작용하는 기제는 두 종류가 있음이 재차 확인되었다. 모형에서 한 기제가 결의 평균 밝기에 민감하다는 가정을 하였을 때도 기존의 연구에서 얻은 결과와 일치하였다. 다른 기제는 결의 평균 밝기와 대비의 조합에 민감하였다.

본 연구에서 조작한 결의 요소는 두 기제에 대조적인 효과를 보여주었다. 모형에서 얻은 두 기제의 민감도 방향이 결 요소의 크기에 따라 체계적으로 변화되기보다는 탐지역에서의 체계적인 변화로 나타남을 보여주었다. 이는 이 기제의 속성이 밝기와 대비의 두 정보의 조합이기보다는 단일 과정으로 고정되어 있을 가능성을 시사한다. 단일 과정으로는 반정류 기제를 들 수 있는데, 특히 부적 반정류(negative half-wave rectification)일 가능성이 높다. 두 가지 종류의 반정류 기제 중에서 부적 반정류 기제에 비중을 두는 이유는 만일 정적 반정류 기제일 경우에는 두 번째 기제의 축의 방향이 IID 결 공간에서 고(高)대비와 높은 밝기(또는 저(低)대비와 낮은 밝기)가 결합되는 방향을 나타내는 0과 $\frac{\pi}{2}$ 사이에 있어야 하다(그림 3 참조). 그러나 이전 연구의 결과

표 1. 최대 우도법으로 얻어진 실험 참가자의 각 시각도 조건별 결 탐지 기제의 축 방향과 역

피험자	시각도	기제 f(밝기 경계 탐지)			기제 g(밝기와 대비 경계 탐지)		
		축 f(고정)	역(S_f)	경사도(K_f)	축 g(θ_g)	역(S_g)	경사도(K_g)
KYA	4.3'	0	0.1525	1.6346	5.7066	0.1646	3.3840
	8.7'	0	0.1658	2.5792	5.4842	0.1576	2.2993
	17.4'	0	0.2093	3.0448	5.5617	0.1562	1.3025
YSJ	4.3'	0	0.2016	1.9250	5.5962	0.1818	2.7270
	8.7'	0	0.1907	3.2070	5.4481	0.1759	3.2195
	17.4'	0	0.2390	2.4848	5.6485	0.1618	1.9636
PYS	4.3'	0	0.1393	2.4252	5.4857	0.2257	1.9723
	8.7'	0	0.1516	2.2627	5.5926	0.1993	1.7613
	17.4'	0	0.1769	1.8318	5.5442	0.1918	3.0078

표 2. 공통 축을 사용한 모형에서 최대 우도법으로 얻어진 실험 참가자의 결 분리 축 방향과 역.

피험자	시각도	기제 f(밝기 경제 탐지)			기제 g(밝기와 대비 경제 탐지)		
		축 f(고정)	역(S_f)	경사도(K_f)	축 g(θ_g)	역(S_g)	경사도(K_g)
KYA	4.3'	0	0.1474	1.9115	5.5436	0.1993	2.2102
	8.7'		0.1686	2.4711		0.1515	2.3948
	17.4'		0.2071	3.0873		0.1585	1.2862
YSJ	4.3'	0	0.1950	1.9372	5.5533	0.1885	2.7645
	8.7'		0.2009	3.3594		0.1654	2.8976
	17.4'		0.2166	2.3369		0.1756	2.2014
PYS	4.3'	0	0.1478	2.2374	5.6517	0.1887	2.3823
	8.7'		0.1625	2.1828		0.1830	1.7895
	17.4'		0.1924	1.1910		0.1719	3.2837

와 본 연구의 결과는 일관되게 $\frac{\pi}{2}$ 와 π 사이 (고(高)대비와 낮은 밝기(또는 저(低)대비와 높은 밝기)가 결합되는 방향)에 두 번째 기제의 방향이 있었다.

Chubb과 Nam(2000)은 결의 변산성을 판단 하는 과제를 사용하여, 변산성 지각을 위해 시각체계가 사용하는 함수의 형태를 추정하였다. 그들은 결 요소의 밝기가 결 대비 지각에 미치는 영향을 상대적으로 측정하였을 때, 기존의 연구(Bergen & Adelson, 1988)에서 가정한 바

와 같이 전정류 변형이 시각체계가 사용하는 함수 형태라면 이차 함수의 모양과 유사할 것이라고 예언하였다. 그러나 평균밝기 이상의 결 요소 밝기는 대비 판단에 거의 영향을 주지 않고, 평균밝기 이하의 결 요소 밝기만이 영향을 주었다. 즉 함수의 형태가 부적 반정류에 유사하다는 결과를 얻었다. 이를 바탕으로 그들은 전정류 기제가 아닌 부적 반정류 기제가 결의 변산성 지각, 즉 결의 대비 지각에 관여한다고 결론 내린 바 있다. 또한 Pearson과 Robinson

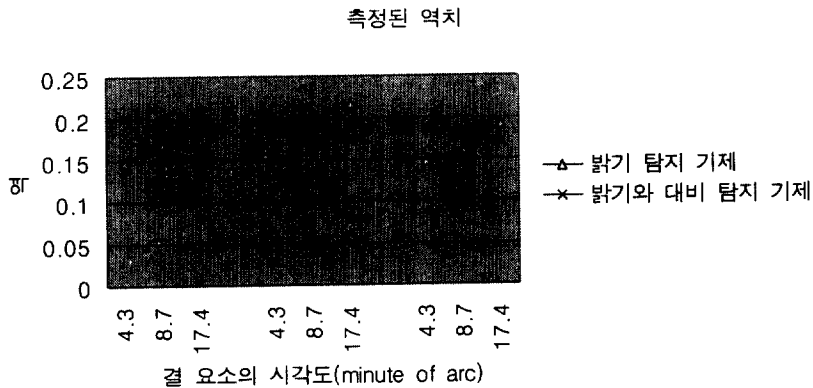


그림 11. 시각도에 따른 각 실험 참가자의 탐지역 변화

(1985)은 계곡 탐지기(valley detector)를 경계 탐지기로 제안한 바 있다 (그림 12). 보통 사람은 하얀 바탕에 검은 선으로 그려진 얼굴은 재인이 잘 되지만, 검은 바탕에 하얀 선으로 그려진 얼굴은 재인 하기 힘들다. 전정류 처리가 된 신호의 경우는 둘간의 차이를 만들지 않는다. 계곡 탐지기는 전자의 예에서 강한 신호를 내도록 되어있는데, 이 탐지기는 부적 반정류 기제의 속성을 담고 있다.

따라서 이차 운동(second-order motion)지각과 이차 결 속성 지각 연구에서 전정류 기제를 가정하게 된 것은 기존 연구들이 전정류 기제와 반정류 기제가 서로 다른 결과를 가져오게 하는 실험 자극을 사용하지 못했기 때문이라고 할 수 있다. 기존의 이차 운동 지각 연구에서 사용된 자극들은 대비를 조작하기 위하여 밝기 쌍 하나를 정하여 평균 밝기에서 더 강한 강도와 더 약한 강도의 방향으로 떨어져 있는 정도를 조작하고 있다(Ledgeway & Smith, 1994). 이러한 자극의 경우 전정류 기제를 가정한 경우나 반정류 기제를 가정한 경우 모두 같은 방식으로 얻어진 결과를 설명하도록 되어있다. IID 결 자극의 경우에는 선택한 밝기 단계 모두를 포함하여 밝기와 대비를 조작하기 때문에 전정류 기제, 정적 반정류 기제, 그리고 부적 반정류 기제의 경우 각각 다른 결과를 가져온다. 그러므로 본 연구의 결과는 기존 연구와 상충하는 것이 아니라, 기존 연구가 밝혀내지 못했던 부분을 드러내주는 것이라고 하겠다.

결 분리 모형에서는 다양한 크기의 탐지기들이 동시에 작용하고, 출력들이 통합되는 것으로 가정하고 있다. 이 들 모형의 가정은 LGN 수준 또는 시각 피질 수준에서 다양한 크기의 수용장을 가진 신경세포가 발견된 사실과 맥락을 같이하고 있다(Hubel & Wiesel, 1969). 다양한 크기의 탐지기들이 있다는 것은 탐지기들이 본 실험에서 가정한 바대로 표집 크기를 달리하여 활동하는 것으로 생각할 수

O	+	-	+	O
O	+	-	+	O
O	+	-	+	O
O	+	-	+	O
O	+	-	+	O

그림 12. 계곡 탐지기. 한 영역의 강도 차이를 계산하여, 주변 밝기가 밝고(+), 중앙에 검은 선(-)이 있을 경우 강한 신호를 발생시킨다.

있다. 그리고 모형들이 가정하는 다양한 크기의 탐지기들이 낸 신호들의 강도가 모든 크기에서 같으리라고 가정하지 않아도 될 것이다. 이는 대비 민감도 함수(contrast sensitivity function)를 고려한다면 명백해지는데, 공간빈도에 따라서 민감도가 달라지는 것을 보여준다. 이를 적용시켜, 각 결 분리 기제에 가장 가중치가 높은 신호를 전달하는 최적 크기의 탐지기가 있고, 그것보다 가중치가 조금 낮은 신호를 전달하는 다양한 크기의 탐지기가 있는 것으로 가정할 수 있다. 그러나 이 가정 하에서 제시된 설명은 최적의 표집 크기를 하나만 가정하고 분석했던 본 연구의 설명과 크게 다르지 않은 것으로 볼 수 있다 (그림 13).

본 연구는 시각도가 충분히 넓은 범위에 대하여 적용한 것은 아니다. 따라서 단순히 증가 경향성과 감소 경향성만을 보이는 것은 한정된 시각도에서 보이는 특성일 수 있다. 따라서 시각도의 적용범위를 확대하여 대비 민감도와 유사하게 뒤집어진 U-형태의 함수 특성을 보이는지 살펴볼 수 있다. 또한 이러한 특성이 본 실험에서 사용된 결 자극을 운동자극으로 구성할 경우에도 유사한 결과를 낳을지는 앞으로 연구에서 규명될 것이다.

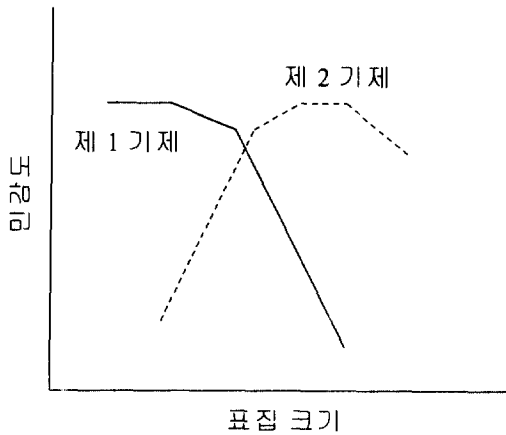


그림 13. 표집 크기에 따른 가상적인 두 기제의 민감도. 밝기 경계를 탐지하는 기제를 제 1 기제라고 하고, 밝기와 대비의 조합 경계를 탐지하는 기제를 제 2 기제라고 임의로 명명하였다. 각 선의 윤곽은 여러 크기의 탐지기들의 민감도를 종합해서 이루어진 것으로 본다.

참 고 문 헌

남종호 (1999). 평균밝기와 대비성의 차원으로 구성된 결 공간에서 결 분리에 작용하는 두 가지 기제. *인지과학*, 10, v3, 39-49.

Barlow, H. B. (1965). Optic nerve impulses and Weber's law. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology*, 30, 539-546.

Beck, J. (1982). Textural Segmentation. In J. Beck (Ed.), *Organization and Representation in Perception* (pp. 285-317). LEA, NJ: Hillsdale.

Beck, J., Sutter, A., & Ivry, R. (1987). Spatial frequency channels and perceptual grouping in texture segregation. *Computer Vision and Image Processing*, 37, 299-325.

Bergen, J.R. (1991). Theories of visual texture perception, In J. Cronley-Dillon (Series Ed.) & D. Regan (Vol. Ed.), *Vision and Visual Dysfunction: vol 10. Spatial Vision* (pp. 114-134). CRC Press, New York: Macmillan.

Bergen, J. R., & Adelson, E. H. (1988). Visual Texture segregation based on energy measures.

Journal of Optical Society of America A, 3(13), 98-101.

Bergen, J.R., & Landy, M.S. (1991) Computational modeling of visual texture segregation. In M. S. Landy & J. A. Movshon (Eds.) *Computational Models of Visual Processing* (pp. 253-271). MIT Press, MA: Cambridge.

Caelli, T. (1985). Three processing characteristics of visual texture segmentation. *Spatial Vision*, 1, 19-30.

Chubb, D.F., Econopouly, J., & Landy, M. (1994). Histogram contrast analysis and the visual segregation of IID textures. *Journal of Optical Society of America A*, 11, 2350-2374.

Chubb, C., & Nam, J-H. (2000). Variance of high contrast textures is sensed using negative half-wave rectification. *Vision Research*, 40, 1677-1694.

Derrington, A. (1990). Mechanisms for coding luminance patterns: are they really linear? In C. Blakemore, *Vision: coding and efficiency*. Cambridge University Press.

Gorea, A., & Papathomas, T. V. (1993). Double- opponency as a generalized concept in texture segregation illustrated with stimuli defined by color, luminance and orientation. *Journal of Optical Society of America A*, 10, 1450-1462.

Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology*, 148, 574-591.

Julesz, B. (1975). Experiments in the visual perception of texture. *Scientific American*, 232, 34-43.

Ledgeway, T. & Smith, A. (1994). Evidence for Separate Motion-detecting Mechanisms for First- and Second-order Motion in Human Vision. *Vision Research*, 34, 2727-2740.

Pearson, D.E. & Robinson, J.A. (1985). Visual communication at very low data rates. *Proceeding of the IEEE*, 73, 795-812.

Shapley, R., & Enroth-Cugell, C. (1984). Visual adaptation and retinal gain controls. *Progress in Retinal Research*, 3, 263-346.

Detection of Texture Boundary by a Negative Half-wave Rectification

Jong-Ho Nam

The Catholic University of Korea

It was reported that texture segregation in the space of the IID texture varying in mean luminance and contrast is mediated by two mechanisms: (1) texture luminance-sensing mechanism, and (2) one which senses the combined property of texture luminance and contrast (Nam, 1995, 1999). This paper studies the characteristics of these mechanisms in texture segregation in adopting three different sizes of texture elements. Specifically, it focuses on how texture luminance and contrast are combined by the second mechanism. We measured the probability of discrimination for various pairs of textures in the IID space with three different texture element sizes. The size of texture elements was manipulated so that the sampling capacity of the mechanisms was systematically influenced. We observed that each threshold produced by two mechanisms was changed systematically in the opposite direction. It was suggested that the second mechanism consists of a single process with a combined property of texture luminance and contrast rather than a dual process which senses texture luminance and contrast separately, then combines these outputs on the next step. A negative half-wave rectification is proposed as a single process in texture segregation for the second mechanism.

keywords texture segregation, psychophysics

초고접수 2000. 10. 30

최종접수 2000. 12. 21