



明るさ知覚の特徴抽出モデル —クレークオブライエン錯視の大域特性—

塚田 章・佐々木和男

富山大学工学部電子情報工学科 〒930 富山市五福 3190

(1994年2月24日受付, 1994年6月17日受理)

Feature Extraction Model on Brightness Perception: Global Characteristic of Craik-O'Brien Illusion

Akira TSUKADA and Kazuo SASAKI

Faculty of Engineering, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama 930

(Received February 24, 1994; Accepted June 17, 1994)

Although many models for human brightness illusion have been proposed, spatial frequency characteristics for the models have not been investigated. We used a feature extraction model to simulate brightness perception for Craik-O'Brien type stimuli as a function of spatial frequency, and compared the results with the psychophysical experiments obtained by Campbell et al, and Burr. Our simulation showed that the existence of a higher spatial frequency limit of Craik-O'Brien illusion depended on the stimuli used, agreeing with the psychophysical results.

1. はじめに

錯視は、ヒトがある像を見る場合実際の物理量と異なる像を知覚する現象で、ヒトの視覚系を反映すると考えられる。したがって、錯視発生メカニズムを調べることは視覚機構解明の有効な手段となる。工学的には、視覚機構のモデルを仮定しこれの入出力特性と実際に心理物理学的な実験から得られた入出力特性を比較し、モデルの正当性が確認できる。これまで明るさ知覚に関して多くのモデルが提案されたが、複数の錯視を同時に説明できるものは少ない^{1,2)}。われわれは³⁾側抑制を用いた特徴抽出モデルを提案し、マッハバンド、クレークオブライエン錯視、同時対比そしてChevreul錯視などを説明し、その有効性を示した。

しかしながら、われわれのモデルを含めてこれまでのモデルは、特定の条件のもとでの錯視のシミュレーションがほとんどで、コントラストあるいは空間周波数に対する依存性などの大域的な特性についての解析は行われていない。大域特性を説明することは、多くの錯視を説

明することと並んで、モデルの正当性については視覚機構を解明する上で重要である。

クレークオブライエン錯視は、一樣な輝度の一部に明暗の輝度差をつけるとその両側の明るさが異なって見える錯視である。この錯視の空間周波数依存性についてこれまで多くの心理物理学的研究がなされている⁴⁻⁶⁾。中でも、Campbellらは、方形波から基本波を除いた高調波を見る場合にこれが方形波として知覚される、すなわちクレークオブライエン錯視が発生することを示し⁷⁾、空間周波数が1 CPD以下の条件で錯視が発生すると結論した⁵⁾。これに対して、Burr⁶⁾はガウス関数と方形波をたたみ込み積分した波形をもとの方形波から差し引いた波形を入力して、Campbellらと同様の実験を行った。その結果、1 CPD以上の周波数でも錯視は発生すると結論した。

本論文では、上述の結論の相違は入力の違いによるものと考え、われわれのモデルで2種の入力に対するシミュレーションを行い、現象の説明を試みる。このため、まず、本モデルの背景と構成について述べる。次に、2

種の入力パターンを示し、本モデルにいくつかのパターンを入力した場合の出力例を示す。最後に、入力空間周波数、コントラストの変化に対する出力の大域特性をシミュレートし、この結果得られるクレークオブライエン錯視の発生する領域と心理物理学の実験結果とを比較検討する。

2. 特徴抽出モデル

2.1 背景

これまでの錯視を説明するモデルは、カプトガニの複眼や脊椎動物の網膜に見られるような側抑制回路に基づくモデルが主である。側抑制モデルはマッハバンドが説明できる。Cohen ら¹⁾は側抑制パターンをエッジ部で分割し、分割された区間内で拡散による平均化を行うことで、マッハバンドに加えクレークオブライエン錯視を説明できるモデルを提案している。

近年、ステップパターンに対するマッハバンドの消失が報告され^{8,9)}、従来の側抑制モデルとの矛盾が指摘されている^{2,10)}。本郷ら²⁾は結合マルコフ確率場理論に基づき、充てん過程のモデルを提案した。このモデルは、輝度パターンの中で変化率の大きい部分だけが入力され、連続している領域をエネルギー最小化により滑らかに補間し、線検出器で不連続と判断された場合補間を打ち切るものである。したがって、2種の輝度の間に勾配がある場合は補間はなされるが、2種の輝度の間に勾配がない場合(ステップパターン)は不連続となり補間は打ち切られ、そのままステップパターンが出力される。すなわち、マッハバンドとその消失が説明できる。さらに、このモデルによればクレークオブライエン錯視もシミュレートできる。しかしながら、ステップパターンだけで構成されるパターンを見る場合に生ずる Chevreaux 錯視(階段状のパターンを見た場合、のこぎり状のパターンが知覚される錯視)や同時対比は、ステップパターンがそのまま知覚されるというこのモデルでは説明できない。

また、Watt ら¹¹⁾はマルチチャンネルフィルタを用いて、フィルタ後のパターンの正成分、負成分の平均からエッジと線を検出する MIRAGE モデルを提案した。このモデルはマッハバンドと Chevreaux 錯視を説明することができ、さらに閾値作用を設けることにより、余弦波に対する感度の空間周波数特性をシミュレートできる。しかしながら、マッハバンドの消失に対する検討はなされていない。

これに対しわれわれは³⁾、側抑制を用いた特徴抽出モ

デルを提案し、マッハバンドとその消失、Chevreaux 錯視、同時対比およびクレークオブライエン錯視に加え、方形波とその基本波、高調波に対する感度の空間周波数特性をシミュレートし、現象の説明を行った。本モデルの構成は次節で述べるが、他のモデルと特に異なる点は近傍淘汰作用である。この作用は仮説であり、今のところ生理学的根拠はないが、上述のごとく多くの現象を説明できることは仮説あるいはモデルの正当性を示唆する。なお、MIRAGE モデルを除く多くのモデルでは、モデルの出力パターンを知覚されるパターンとして議論がなされているので、本論文でも種々の空間周波数でのクレークオブライエン錯視を調べるのに出力パターンを知覚されるパターンとして議論を進める。

2.2 構成

本論文では簡単化のため、網膜を一次元的で様な構造とし、視角1分あたり1個の視細胞が直線的に配列されていると考える。また、計算はアナログ量で行い、時間は考慮しない。本モデルは入力パターンから特徴を抽出する過程を示したもので、その後、隣合う情報を直線的に結ぶような充てん処理が行われることを仮定する。なお、本論文ではこの充てん処理機構の詳細は取り扱わない。

本モデルは側抑制を行うL層、L層の出力の変化率を計算するD層、D層の出力のピークを検出するP層、およびP層の出力により、L層からの入力のゲーティングを行うG層の4層で構成される。

側抑制の結合関数はある地点と x 離れた地点からの入力の結合係数を表し、次に示す DOG 関数を用いる。

$$W(x) = \left(\frac{r}{\sqrt{\pi}} + 1 \right) \frac{1}{\sigma_1} \exp(-x^2/\sigma_1^2) - \frac{1}{\sigma_2} \exp(-x^2/\sigma_2^2) \quad (1)$$

側抑制後のL層 n 番目のニューロンの出力 $L(n)$ は、 k 番目の入力 $S(k)$ とその位置での結合係数 $W(k-n)$ との積を $k=-\infty$ から ∞ まで加え合わせることで求められ、

$$L(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} W(k-n)S(k) \quad (2)$$

と表される。(1)式において、 σ_1, σ_2 はそれぞれ興奮性、抑制性の空間的な広がりを表す定数である。また、 r は平坦な入力に対する出力の割合を表す定数である。なぜなら、(2)式を連続系で表現し、大きさ1の平坦な入力を加えた場合の出力は、

$$L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} W(x)dx = r \quad (3)$$

となるからである。本論文では $\sigma_1=5, \sigma_2=16.4, r=0.7$ とした。この場合の結合関数を Fig. 1 に示す。

次に、特徴抽出部の構成を Fig. 2 に示す。D層で計算される変化率 $D(n)$ をL層における二つのニューロンの出力の差の絶対値と定義する。すなわち、

$$D(n) = |L(n+1) - L(n)| \quad (4)$$

である。なお、わずかな変化率を除去するため $\theta=1$ の閾値作用を設ける。

ピークは、D層 n 番目のニューロンを中心とする近傍区間を Q_n とすれば、 Q_n に含まれるすべてのニューロンの出力 $(D(k); k \in Q_n)$ のなかで、 n 番目のニューロンの出力 $D(n)$ が最大の場合と定義する。したがって、ピークを検出するP層ではこれに対応したニューロンだけが発火する。本論文では Q_n に含まれるニューロンの数を 11 個とした。

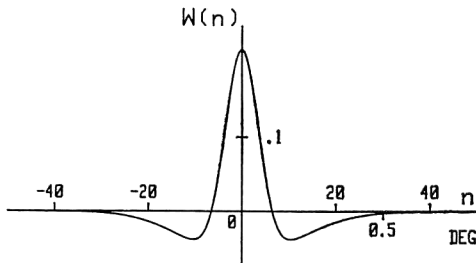


Fig. 1 Coupling function ($\sigma_1=5, \sigma_2=16.4, r=0.7$).

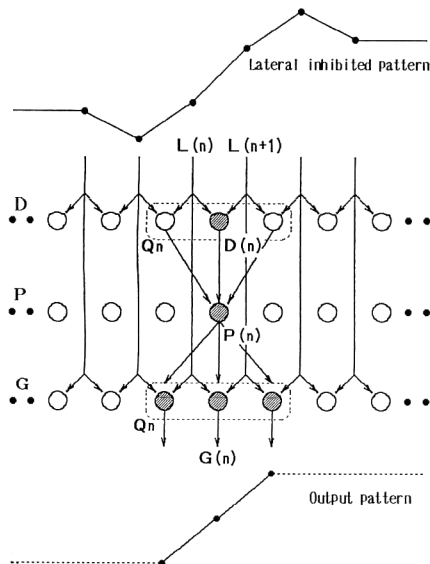


Fig. 2 Feature extracting construction. D: calculation of difference, P: peak detection, G: gating.

$$P(n) = \begin{cases} D(n) & D(n) = \max \{D(k); k \in Q_n\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

P層 n 番目のニューロンがピークとなる場合、 $P(n)$ はG層の Q_n に対応するニューロンのシナプスを伝達可能にし、L層からの入力が出力される。言い換えると、G層 n 番目のニューロンは、P層の Q_n に対応するニューロンのいずれかに出力があれば導通状態となる。この場合 $D(n), P(n)$ が $L(n)$ と $L(n+1)$ により得られることから、 $G(n)$ の出力を $L(n)$ と $L(n+1)$ の平均値とする。

$$G(n) = (L(n) + L(n+1)) / 2 \quad \max \{P(k); k \in Q_n\} \neq 0 \quad (6)$$

また、それ以外の場合ゲートは非導通状態となることを想定しており、出力が現れない。したがって、G層からは特徴だけが出力されることになる。

以上の構成により本モデルでは、入力に対する側抑制パターンのある点の変化率が、その近傍の変化率の中で最大の場合、近傍に対応する側抑制パターンだけが特徴として出力される。言い換えると、変化率パターンの極値となる点の近傍にそれより大きな変化率が存在すればその部分は特徴とはならない。一方、たとえ小さな値(閾値を超える)でも、近傍にそれより大きな変化率がなければ特徴となる。本研究では、各近傍において情報の淘汰がなされることから、この作用を近傍淘汰作用と呼ぶ。

3. シミュレーション結果と考察

Fig. 3 に2種の入力パターンを示す。Fig. 3 (a) 下段の高調波は、上段の方形波から中段の基本波を引いた

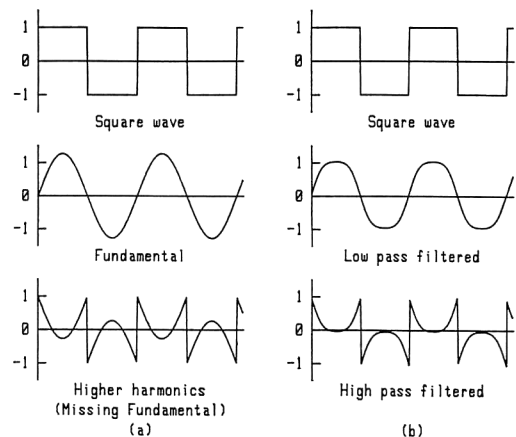


Fig. 3 Generation of input pattern. (a) MF, (b) GF.

ものであり, Campbell らの実験に用いられた (以後, この入力パターンを missing fundamental; MF 波と呼ぶ). Fig. 3 (b)下段の波形は上段の方形波にガウスフィルタを施し (中段), これをもとの方形波から引いたものであり, Burr の実験に用いられた (この波形が Gaussian filter によって生成されることから, 以後 GF 波と呼ぶ). なお, 本論文で用いたガウス関数は,

$$F(x) = \exp\{-x^2/(2\sigma_s^2)\} / (\sigma_s\sqrt{2\pi}) \quad (7)$$

ここで, $\sigma_s = T/12$, T は方形波の周期である.

また, 入力の大さきの指標となるコントラスト c は通常, 入力の平均輝度に対する輝度差と定義されるが, 本論文では平均輝度を h (すべての入力において 100一定とする), 輝度差を Fig. 3 のパターンに対する倍率 a とし, $c = a/h$ と定義する.

本モデルに入力を加えた場合の各層の出力例を Fig. 4 に示す. Fig. 4 (a)~(c) の空間周波数-コントラストはそれぞれ, 1.0 CPD-0.12, 1.0 CPD-0.09, 1.15 CPD-0.12 の GF 波である. 1 段目は入力パターン $S(n)$, 2 段目は側抑制後のパターン $L(n)$, 3 段目は変化率パターン $D(n)$ とピークとして検出される点 (・印), そして 4 段目はゲーティング後の抽出されたパターン $G(n)$ (実線) とその後の充てん処理 (破線) の出力パターンである.

Fig. 4 (a) の変化率パターンでは, 各境界付近で三つのピークが検出され, この近傍区間の側抑制パターンが G 層の出力となる. 充てん処理後の出力パターンにおいて, 錯視はみられない. Fig. 4 (b) は Fig. 4 (a) よりコントラストが小さいため, 変化率パターンの振幅も小さくなる. これが D 層に入力する場合, 閾値作用により境界両側の変化率がゼロとなり, Fig. 4 (a) において検

出された三つのピークのうち境界部だけがピークとして検出される. したがって, 充てん処理後の出力は輝度境界の両側が異なる明るさとなり, クレークオブライエン錯視が発生する.

Fig. 4 (c) はコントラストを Fig. 4 (a) と同一とし, 空間周波数を増加した場合で, 境界両側の変化率は閾値を越えるが, 空間周波数が高くなるため近傍淘汰作用により淘汰される. この場合も境界部だけがピークとなり, 錯視が発生する. このように本モデルにおいて, 錯視は閾値あるいは近傍淘汰作用により生じる.

Fig. 5, 6 は入力パターンの空間周波数, コントラストを変化させた場合の出力パターンの大域特性である. Fig. 5 は MF 波を入力した場合で, 出力パターンは実線あるいは破線で仕切られた四つの領域に分類できる. R1 は方形波, R2, R3 は入力と類似のパターン, R4 は 3 次高調波と知覚される領域である. これらのどの領域にも属さない低いコントラストの領域は明暗が知覚できない. それぞれの領域の代表的なパターンを图示してある. R2, R4 について, 比較的高いコントラストで空間周波数を増加させると, 出力は特徴同士が接近し入力と類似のパターン (R2) から徐々に 3 次高調波 (R4) に移行するのでこれらの境界は明確ではない. Campbell らは 1 CPD を超える周波数で 3 次高調波が知覚されるという実験結果を得ている. 本モデルによるシミュレーション結果では 1.1 CPD 以上で特徴が連続となるが, この周波数と知覚されるパターンが Campbell らの結果と符合することから, R2 と R4 の境界を特徴が連続となる周波数と判断し, 破線で示した.

Fig. 5 において, クレークオブライエン錯視の発生する領域は方形波として知覚される領域で, 主に 1.0

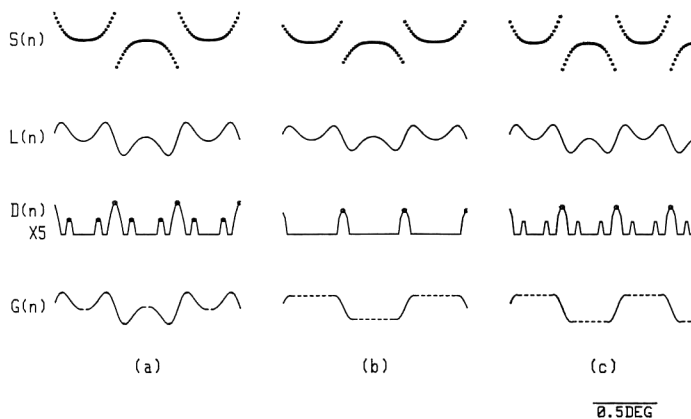


Fig. 4 Simulation results for the GF. Spatial frequency-contrast of (a)-(c) are 1.0 CPD-0.12, 1.0 CPD-0.09, and 1.15 CPD-0.12, respectively.

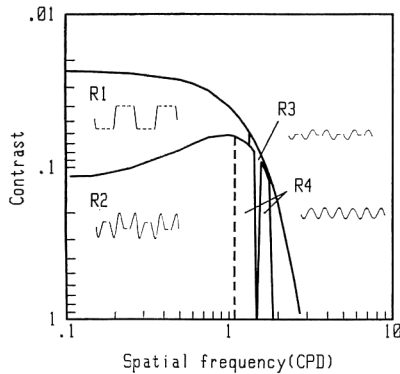


Fig. 5 Global characteristic of output pattern for MF.

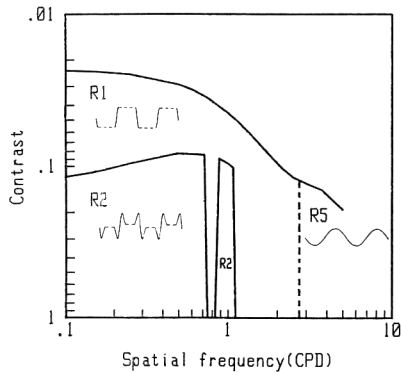


Fig. 6 Global characteristic of output pattern for GF.

CPD 以下に分布し、1.4 CPD までに急激に減少する。この領域は Fig. 4 (b) で説明した閾値作用によるものである。

Fig. 6 は GF 波を入力した場合で、出力パターンは三つの領域に分類できる。R1, R2 は Fig. 5 に対応しており、R5 は基本波と知覚される領域である。R1 と R5 の境界は、MF 波における R2, R4 と同様明確ではないが、ここでも抽出されたパターンが連続するところから R5 と判断し、破線で示した。Fig. 6 において、輝度境界の両側が異なる明るさになるという意味で、方形波と知覚される領域 R1 以外に基本波として知覚される領域 R5 が錯視の発生する領域であると考えられる。したがって、クレークオブライエン錯視は 2.7 CPD を越える高い周波数でも発生することになる。なお、領域 R1 の 0.8 CPD 付近と 1.1 CPD 以上は、近傍淘汰作用により錯視が発生する部分である。この結果では、錯視はコントラストに依存しないことになるが、この点は心理物理学の実験結果と異なる。

心理物理学の実験において、Campbell らは 1 CPD 以上では錯視が生じないという結果を得たのに対して、Burr はそれ以上の周波数でも錯視は発生すると結論した。本論文ではこれら二つの実験の入力が違うことに着目し、シミュレーションを行い、クレークオブライエン錯視は 1 CPD 以上でも発生するという結果を得た。したがって、Burr を指示する結果となる。しかしながら、MF 波を入力した場合は、Campbell らの実験結果と錯視の発生する領域が類似していることに加え、1 CPD 以上で 3 次高調波が知覚される点が符合する。MF 波に限れば Campbell らの結果は正しいことになるが、クレークオブライエン錯視は MF 波以外の入力に対しても発生することから両者の結論が矛盾したのである。

4. む す び

われわれの提案する特徴抽出モデルに MF, GF 波を入力し、出力の大域特性のシミュレーションを行った結果、矛盾する心理物理学の所見を説明することができた。このことは、生体における現象を理解する上で意義があると同時に、本モデルの正当性については視覚機構解明への有効性を示したことになる。

本論文では視細胞の配列を一様としたが、実際の網膜は中心に近いほど密度が高い。したがって、より厳密な空間的現象をシミュレートするには、密度を考慮したモデルに精緻化することが必要である。また、今後時間空間的な現象を取り扱うには、時間を考慮したモデルを構成することが課題である。

本研究の一部は、実吉奨学会の助成による。ここに記して感謝する。

文 献

- 1) M. Cohen and S. Grossberg: "Neural dynamics of brightness perception: features, boundaries, diffusion, and resonance," *Percept. Psychophys.*, **36** (1984) 428-456.
- 2) 本郷節之, 乾 敏郎, 川人光男: "明るさ知覚の計算理論と神経回路モデル", *信学論*, J75-D-II (1992) pp. 1959-1967.
- 3) 塚田 章, 佐々木和男, 八木 寛: "側抑制を用いた明るさ知覚の特徴抽出モデル", *信学論*, J77-D-II (1994) pp. 866-873.
- 4) G.D. Sullivan and M.A. Geogeson: "The missing fundamental illusion: variation of spatio-temporal characteristics with dark adaptation," *Vision Res.*, **17** (1977) 977-981.
- 5) F.W. Campbell, E.R. Howell and J.R. Johnstone: "A comparison of threshold and supra-threshold appearance of gratings with components in the low and high spatial frequency range," *J. Physiol.*, **284** (1978) 193-201.

- 6) D.C. Burr: "Implications of the Craik-O'Brien illusion for brightness perception," *Vision Res.*, **27** (1987) 1903-1913.
- 7) F.W. Campbell, E.R. Howell and J.G. Robson: "The appearance of gratings with and without the fundamental Fourier component," *J. Physiol.*, **217** (1971) 17-18.
- 8) J. Ross, J.J. Holt and J.R. Johnstone: "High frequency limitation on Mach bands," *Vision Res.*, **21** (1981) 1165-1167.
- 9) F. Ratliff: "Why Mach bands are not seen at the edges of a step," *Vision Res.*, **24** (1984) 163-166.
- 10) J. Ross, M.C. Morrone and D.C. Burr: "The conditions under which Mach bands are visible," *Vision Res.*, **29** (1989) 699-715.
- 11) R.J. Watt and M.J. Morgan: "A theory of the primitive spatial code in human vision," *Vision Res.*, **25** (1985) 1161-1174.