

G-004

## 順応特性を導入した錐体モザイクモデル Retinal cone mosaic model with the dynamic adaptation

金石 彩菜<sup>†</sup>      神山 齊己<sup>†</sup>  
Ayana Kanaishi   Yoshimi Kamiyama

### 1. はじめに

網膜は目に入った光を外界の情報を受容、処理し、脳に伝達している。網膜の中で光を感知し、電気信号に変換する役割を果たす細胞が錐体視細胞である。錐体視細胞の持つ重要な特性の1つに順応特性がある。順応特性のメカニズムは、時間的に変化する光刺激の状態に合わせ、細胞が反応する光強度の範囲をダイナミックに変化させることである。先行研究[1]では、生理学的、解剖学的特性に基づいた光応答モデルが構築された。本研究では、先行研究では考慮されていなかった順応特性をモデルに導入した。その後、情報量を指標として用いて、順応特性が錐体視細胞の応答にどのような影響を及ぼすかを解析した。

### 2. 順応(Adaptation)

順応特性とは、時々刻々と変化する光刺激に錐体視細胞の特性が動的に変化することである。Clarkらによって、動的順応を再現した数理モデル(DAモデル)が提案された[2]。DAモデル(図1)は、時間スケールの異なる2つのフィルタを用いることで、順応特性に関わる錐体視細胞内のカルシウムフィードバック要素を再現している。この再現により、DAモデルはフリッカーなどの細かく複雑な刺激に対する順応の振る舞いを予測する性質を持つことができ、短期間の順応を表現することができる。

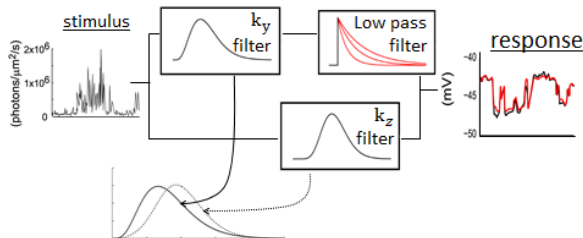


図1 DAモデルの概略図

### 3. 錐体光応答モデル

先行研究[1]によって構築された錐体光応答モデルには、解剖学的特性と、生理学的特性が存在している。

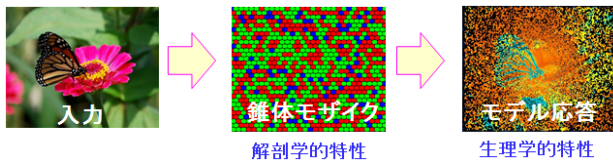


図2 光応答シミュレーションのイメージ図

#### 3.1 解剖学特性

解剖学的特性として、錐体視細胞は網膜の中心部で密度が高いが、周辺部では密度が低いこと(図3(a))、また、3種

類の錐体 (L, M, S) の分布には個人差が存在すること、S錐体の存在比が少ないことがあげられる。

#### 3.2 生理学的特性

錐体視細胞に光が照射された時の一連の応答プロセスを微分方程式で表現したモデルが使用されている。本研究では、先行研究で使用された van Hateren モデル[3]から、順応を導入した DA モデルに変更した。さらにこれらのモデルには錐体視細胞の波長感度が考慮されていなかったため、波長感度特性(図3(b))を導入した。

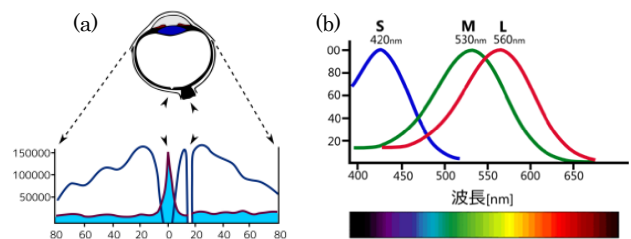


図3(a)錐体視細胞の分布密度, (b)波長感度特性

### 4. 情報量の算出

相互情報量は通信の分野において送信信号の情報が受信信号にどれだけ含まれるかを図る尺度である。本研究では、入力画像とモデル応答の相互情報量を求めることで、入力画像の情報がどれだけ錐体モザイクに伝達されたかを解析する。本モデルにおける相互情報量のイメージを図3に示す。

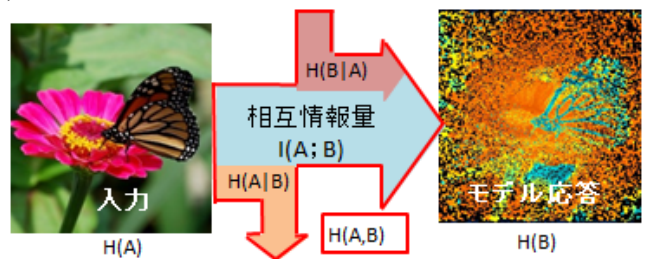


図4 相互情報量のイメージ図[4]

#### 4.1 相互情報量の計算方法

相互情報量の計算は以下の手順で行う。

##### 1) 二次元ヒストグラムの作成

まず、入力画像とモデル応答の値をそれぞれ設定したビンでレベル分けする。入力画像の輝度値  $r, g, b$  をレベル  $X_r, Y_g, Z_b$  に、L錐体、M錐体、S錐体のモデル応答を  $X_L, Y_M, Z_S$  に分ける。入力画像のレベルを  $a = (X_r, Y_g, Z_b)$ 、モデル応答のレベルを  $b = (X_L, Y_M, Z_S)$  と表す。入力画像とモデル応答の同じ位置のレベルを一組として、組合せの数をカウントすることで、二次元ヒストグラム  $hist(a, b)$  を作成する。

<sup>†</sup> 愛知県立大学大学院 情報科学研究科

2) 同時確率, 周辺確率の計算

次に, 同時確率 $p(a_i \cap b_j)$ は式(1), 周辺確率 $p(a_i)$ 及び $p(b_j)$ は式(2)を用いて求める.

$$p(a_i \cap b_j) = \frac{hist(a_i, b_j)}{\sum_{i=1}^{bin^3} \sum_{j=1}^{bin^3} hist(a_i, b_j)} \quad (1)$$

$$p(b_j) = \sum_{i=1}^{bin^3} p(a_i \cap b_j), p(a_i) = \sum_{j=1}^{bin^3} p(a_i \cap b_j) \quad (2)$$

3) 相互情報量の計算

同時確率 $p(a_i \cap b_j)$ , 周辺確率 $p(a_i)$ ,  $p(b_j)$ を用いて, 式(3)によって, 相互情報量 $I(A; B)$ を計算する[5].

$$I(A; B) = \sum_{i=1}^{bin^3} \sum_{j=1}^{bin^3} p(a_i \cap b_j) \log_2 \frac{p(a_i \cap b_j)}{p(a_i)p(b_j)} \quad (3)$$

5. シミュレーション

順応特性を導入した錐体モザイク(DA)モデルと順応特性を導入していない錐体モザイク(van Hateren)モデルを用いてシミュレーションを行った. 視野角を3度(錐体数およそ6万個)とし, 図5のような動画を入力刺激とし, シミュレーション時間を1.1秒とした.



図5 入力動画のキャプチャ

5.1 モデル応答

図6(a)は, シミュレーションを開始後, 100[msec]に動画を入力した際の, 450[msec]時点での各モデル応答である. また図6(b)は, 図6(a)の赤丸で囲った部分の入力刺激の変化, 図6(c)はL錐体, M錐体, S錐体の応答の変化を表している. 同じ入力でも, 錐体の種類によって応答が異なっていることがわかる. これは, 3.2で述べた生理学的特性である. また, DAモデルの応答とvan Haterenらのモデル応答には違いが生じている. この違いについて定量的に解析を行うために, 5.2にて情報量を用いて解析を行う.

5.2 相互情報量の計算

4で説明した方法を用いて, 入力画像とモデル応答を用いて情報量の計算を行った. なお, 今回は各ピンを4とした. その結果は図7であり, 順応特性を導入した方の情報量が高いことが分かった. また, 順応特性を導入することによって, 時間が変化したときの情報量の変化が大きくなる事が分かる.

6. まとめ

本研究では順応特性を導入した錐体モザイクモデルを構築した. 情報量を用いて, 順応特性の有無による応答を比較した. その結果, 順応特性があることにより, 相互情報

量の値が高くなる, つまり, より情報を伝達することが分かった. 今後は, 今回取り上げた, 光順応だけではなく, 明順応や暗順応などをモデルに組み込みたいと考えている.

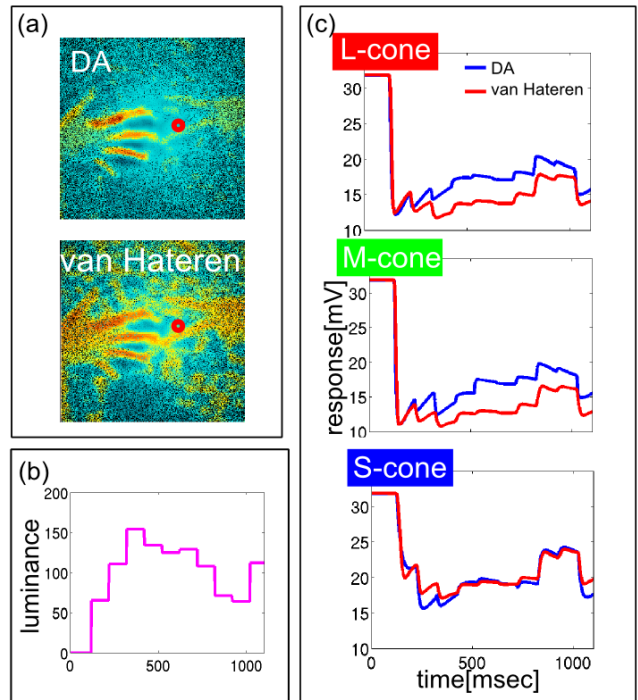


図6 シミュレーション結果 (a)モデル応答, (b) (a)の赤丸で囲まれた部分の入力刺激の変化, (c) L錐体, M錐体, S錐体の応答の変化

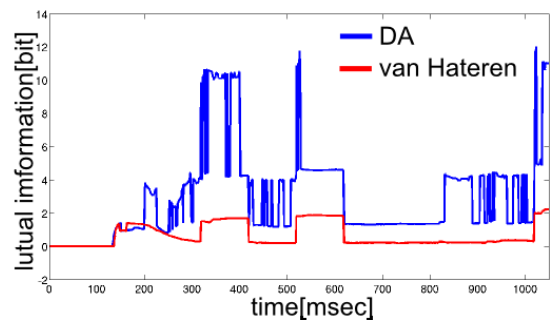


図7 相互情報量

参考文献

[1] 曾根大樹, 神山齊己 (2011), “霊長類網膜錐体モザイクの大規模数理モデル”, 電子情報通信学会技術研究報告, NC, ニューロコンピューティング 111(367), 2011-84, 1-6.  
 [2] Clark, D., Benichou, R., Meister and da Silveria, R. A.(2013), “Dyanamical adaptation in photoreceptors”, PLoS Computational Biology, 9, 1-27.  
 [3] van Hateren, J. H., Snipee, H. P.(2007), “Simulationg human cones from mid-mesopic up to high-photopic luminances”, Journal of Vision, 7, 1-11.  
 [4] 篠原広行, 伊藤猛, 今井貴祐, 伊藤賢司, 橋本雄幸(2006), “断層映像法の基礎 第20回 画像の相互情報量”, 断層映像研究会雑誌, 33(3), 154-160.  
 [5] Marin-Franch, I., Foster, D. H.(2012), “Estimating information from ”IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence VOL.35, NO.1.