

# 動的順応特性を導入した錐体モザイクモデルに関する研究

金石 彩菜

指導教員：神山 齊己

## 1 はじめに

網膜に存在する錐体視細胞は外界の光刺激を受け取って電気信号に変化するセンサの役割を担い、視覚情報処理の入力部として機能している。錐体視細胞の持つ重要な特性の一つに順応特性がある。これは時間的に変化する光刺激の状態に合わせ、錐体視細胞の動作レンジをダイナミックに変化させる仕組みである。視細胞の順応特性は外節レベルの分子機構によって実現され、従来より、その詳細を明らかにするために実験的解析や数理モデル構築が進められてきた。しかし、錐体モザイクに対する順応特性を考慮した光応答の解析は行われていない。一方、先行研究において、生理学的・解剖学的特性に基づいた錐体視細胞の数理モデルが構築され [1]、相互情報量等を用いて錐体視細胞の視覚情報処理を定量的に解析することが可能になった [2]。しかし、この解析の入力として使用されたのは静止画像である。より現実世界に近似させたシミュレーションや定量的な解析を行うためには、入力光の時間変化に対応した応答を示す順応特性を考慮する必要がある。そこで、本研究では、順応特性を考慮した錐体モザイクの光応答モデルの構築を行うと共に、入力光が時間変化した際の錐体視細胞の視覚情報処理を定量的に解析した。

## 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 (Dynamic Adaptation モデル (以下、DA モデル)) [3] が提案された。本研究ではこの DA モデルの導入を行う。

### 2.1 DA モデル

DA モデルとはフラッシュ、ステップ、フリッカー刺激など、時間的な入力の変化と様々な背景の光強度に対応した光応答モデルであり、短期間の順応の応答を再現している。このモデルでは、2つのフィルタ ( $k_y$ ,  $k_z$ ) に刺激を畳み込んだものにローパスフィルタをかける合わせることで、モデルの応答を求めている。2つのフィルタは同じ形をしているが、異なる時間スケールを持っている。 $k_z$  フィルタの方が遅れた時間スケールを持っており、 $k_z$  フィルタに刺激を畳み込むことによって、錐体内の順応に関わるカルシウムフィードバックを表現している、フィードバックを考慮することで、フリッカー刺激などの時間に対して素早く変化する複雑な刺激に対して順応の振る舞いを予測する性質を持つことが可能になる。

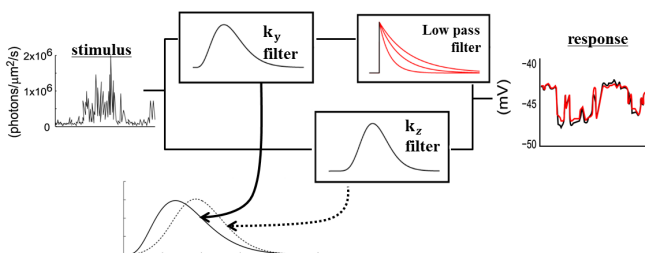


図1 DAモデルの概略図

## 3 錐体視細胞モデル

先行研究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。

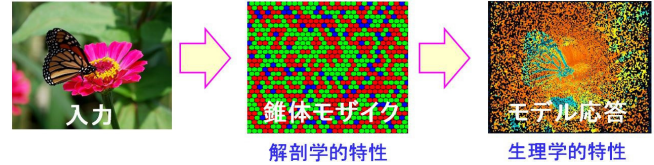


図2 シミュレーションのイメージ図

### 3.1 解剖学的特性

解剖学的特性として、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、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

錐体に光が照射されたときの一連の応答プロセスのことである。先行研究ではこのプロセスを微分方程式で表現した van Hateren らのモデル [4] を用いていた。本研究では、van Hateren らのモデルを順応を考慮した 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受度が考慮されていなかったため、波長感受度特性を導入した。

## 4 相互情報量

相互情報量は通信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測る尺度である。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。

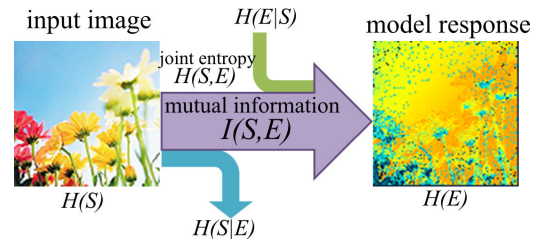


図3 相互情報量のイメージ図 [5]

### 4.1 相互情報量計算方法

相互情報量の計算は以下の手順で行う。

1. モデルシミュレーション
2. 入力刺激強度、モデル応答の変化量の算出、レベル分け  
フレーム毎の刺激、応答の変化量の算出を行う。また、求めたそれぞれの変化量を設定された範囲 (ビン) のレベルへ分類する。なお、各ビンを 100 とした。
3. 二次元ヒストグラムの作成  
横軸に入力刺激強度のレベル分けをしたときの配列 ( $in_x$ )、縦軸にモデル応答の大きさをレベル分けをしたときの配列 ( $V_y$ ) としたときの組み合わせをカウントした二次元ヒストグラムを  $hist(in_x, V_y)$  と表す。

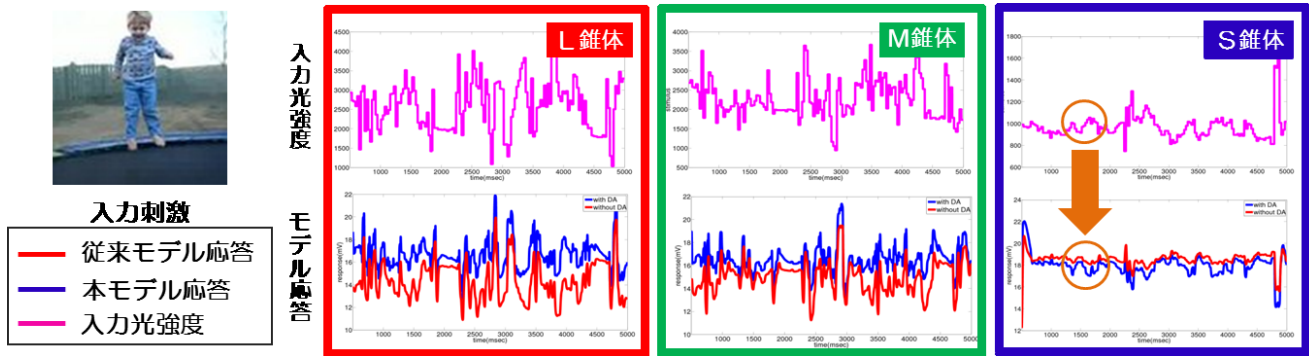


図4 シミュレーション結果 (順応特性)

#### 4. 同時確率, 周辺確率の計算

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

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

$$p(s_i) = \sum_{j=1}^{\text{bin}^3} p(s_i \cap e_j)$$

$$p(e_j) = \sum_{i=1}^{\text{bin}^3} p(s_i \cap e_j) \quad (2)$$

#### 5. 相互情報量の計算

同時確率  $p(s_i \cap e_j)$ , 周辺確率  $p(s_i)$  及び  $p(e_j)$  を用いて, 式 (3) によって, 相互情報量  $I(S; E)$  を計算する.

$$I(S; E) = \sum_{i=1}^{\text{bin}^3} \sum_{j=1}^{\text{bin}^3} p(s_i \cap e_j) \log_2 \frac{p(s_i \cap e_j)}{p(s_i)p(e_j)} \quad (3)$$

### 5 シミュレーション

#### 5.1 モデル応答

動的順応特性を導入した錐体モザイク (DA) モデルと, 動的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 1 度 (錐体数およそ 1 万個) とし, シミュレーション時間を 5 秒とした. その時の入力刺激の動画のキャプチャ (図 4) 左と, サブタイプごとの入力光強度の変化とモデル応答の一例を図 4 右に示す. なお, 青線が動的順応特性を導入した本モデルの応答, 赤線が順応特性が導入されていない従来モデルの応答である. このとき, 図 4 を見ると, 動的順応を導入した本モデルと導入していない従来モデルでは, 入力と同じにも関わらず, 応答が異なっていることが分かる. 特に, S 錐体のオレンジの丸で囲まれている部分の応答を見ると, 従来モデルには電位の変化が見られないが, 動的順応特性を導入することによって, 本モデルには電位変化が生じることが分かる. この違いについて定量的に解析を行うために, 5.2 で情報量を用いて解析を行う.

#### 5.2 相互情報量の計算

4.1 で説明した方法を用いて, 入力と, モデル応答間の相互情報量の計算を行った. 図 5 はその結果である. 青線が動的順応有りの場合の相互情報量の変化, 赤線が動的順応無しの場合の相互情報量の変化を示している. 動的順応を導入すると全体的に情報量が高くなる事が分かる.

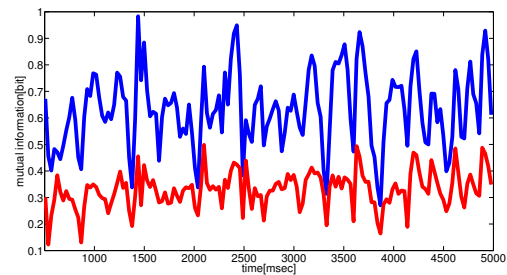


図5 相互情報量

### 6 まとめ

先行研究では, 生理学・解剖学から得られた錐体視細胞の網膜上の分布, 各錐体視細胞の存在比をモデル化し, 錐体モザイクを人工的に生成した. また, 従来の光応答モデルに錐体のスペクトル感度を導入し, 波長による吸収率の違いを再現した. そして, これらを組み合わせて, 網膜上の錐体視細胞の応答を再現できる数理モデルを構築した. 本研究では, 従来モデルの動的順応特性を導入した新しいモデルを構築した. そして, 動的順応特性が錐体モザイクの情報表現に及ぼす影響を相互情報量を指標として用いることで, 定量的に解析し, 動的順応特性を導入することにより, 相互情報量が大きくなった. これは, 入力刺激の変化が錐体モザイクの応答に伝達されていることを表していると考えられる.

#### 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, NC2011-84, 1-6
- [2] 國枝芽衣, 神山齊己 (2014), “数理モデルを用いた網膜錐体間カップリングの機能解析”, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2014-44, 1-6
- [3] Clark, D., Benichou, R., Meister and da Silveria, R. A. (2013), PLoS Computational Biology, 9, 1-27.
- [4] van Hateren, J. H., Snippe, H. P. (2007), “Simulating human cones from mid-mesopic up to high-photopic luminances”, Journal of Vision, 7, 1-11
- [5] 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, 第 33 巻, 第 3 号, 154-160