

動的順応特性を導入した網膜視細胞の数理モデル

情報科学科 金石 彩菜

指導教員：神山 斉己

1 はじめに

網膜の中で視細胞は、外界から受け取った光刺激を電気信号に変換する役割を担う。こうした視細胞の持つ重要な特性の一つに順応がある。これ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動的に変化させる仕組みである。これまでの順応特性に関する研究において、その仕組みなどを明らかにするための実験的解析や数理モデル構築が進められてきた。しかし、網膜の順応特性を考慮した光応答の解析は行われていない。本研究では、入力刺激の変化に対する光応答に順応特性が及ぼす影響を解析するために、先行研究 [1] で構築された錐体モザイク生成モデルに順応特性を再現したモデルを導入し、新たに数理モデルを構築した。

2 順応 (Adaptation)

視覚環境の背景輝度は 10^{-3} [cd/m²] から 10^5 [cd/m²] と 10^8 オーダーで変化する。しかし、ヒトの視覚系が反応できる光の強度は 10^3 オーダーである。背景輝度のオーダーに対して、ヒトが受け取る光強度のオーダーは小さいにも関わらず、さまざまな光強度の刺激を認識できるのは視覚情報処理が光強度の変化にダイナミックに適応するという特性が存在するからである。この特性を「順応」という。順応には明順応、暗順応などが存在するが、本研究では数十ミリ秒程度のスケールで起こる光順応を対象とする。そのため本研究では Clark ら [2] によって提案された DA モデルを利用する。

DA モデルの構造は図 1(右上)であり、二つのフィルタにそれぞれ刺激を畳み込んだものを組み合わせ、ローパスフィルタに掛け合わせることで短期間の順応の応答を再現するモデルである。二つのフィルタは同じ形をしているが、時間スケールが異なっている。遅れた時間スケールを持つフィルタに刺激を畳み込んだものを、もう一つのフィルタの畳み込みをしたものに、足し合わせることで、錐体内の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る。そのため、さまざまな入力に対応することができる。入力刺激が大きく変動したときでも、応答は素早く変化することができる。

3 錐体光応答モデル

本研究では、曾根 [1] の錐体モザイク生成モデルに光応答モデルとして先ほど説明した DA モデルを組み込むことで、順応特性を導入した視細胞の数理モデルを構築した。

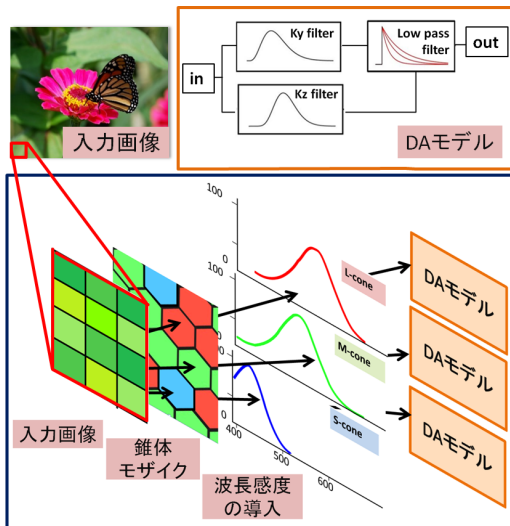


図 1 本研究で構築した数理モデルの概略

図 1(下) は構築したモデルの流れを入力画像の 1 部分を拡大して示したものである。モデルの流れを以下に示す。光刺激を、入力画像の 1pixel と 1 つの錐体を対応づけて入力する。錐体には 3 種類 (L, M, S) のサブタイプが存在し、異なる波長感度が存在するため、錐体タイプの波長感度に合わせて入力刺激を求める。求めた入力刺激を DA モデルへ入力し、シミュレーションを行なう。この流れをシミュレーションで使用するすべての錐体で行なう。

4 シミュレーション結果

図 2 はシミュレーションで使った入力画像 (左) とそれぞれの位置における光応答シミュレーションの結果である。グラフの横軸を時間 [msec]、縦軸 (左) が応答 [mV]、縦軸 (右) が刺激強度を示しており、青線が従来モデルの光応答、赤線が DA モデルの光応答である。緑線は入力刺激強度の変化である。一番上のグラフから順番に、L 錐体、M 錐体、S 錐体の応答を示す。左下のグラフは画像の示した位置付近の L 錐体 (赤)、M 錐体 (緑)、S 錐体 (青) の DA モデルの応答を示したものである。

光の入力刺激強度は 50[msec] ごとに変化させ、シミュレーションを行った。入力刺激が変化すると、順応特性を導入した DA モデルの方が光刺激の変化 (タイミング、刺激の強弱) に追従した応答をしていることがわかった。L 錐体の応答を見ると入力刺激強度の変化に対して DA モデルの応答の落ちつきは早く、入力刺激の大小の変化にも DA モデルの応答の大小が対応していることがわかる。これは、他の位置でも同様である。また、左下のグラフをみると、ほぼ同じ刺激を入力しているが、応答の大きさが異なっている。すなわち、錐体タイプによる波長感度の違いを考慮したため、タイプによる応答の違いが再現できている。

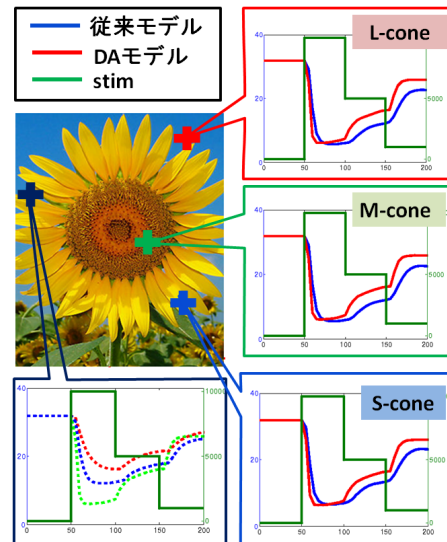


図 2 光応答シミュレーション

5 まとめ

本研究では、順応特性を導入した網膜錐体視細胞の数理モデルを構築した。シミュレーションより、従来モデルの結果と比べ、入力光刺激が変化したときの落ちつきが早いこと、入力光強度に応答の大きさが依存していることから、順応特性を再現できていることを確認した。今後、背景光の変化や動画入力の場合のシミュレーション解析を行い、順応特性が視覚情報処理に与える影響をさらに明らかにする。

参考文献

- [1] 曾根大樹 (2012), 平成 23 年度修士論文
- [2] Clark, D., Benichou, R., Meister and da Silveira, R. A. (2013), PLoS Computational Biology, 9, 1-27.