

解剖学的特性に基づいた網膜視細胞モザイクの数理モデルに関する研究

齋藤 尚美

指導教員：神山 齊己

1 はじめに

網膜には、錐体と桿体の 2 種類の視細胞が存在し、外界からの光情報を電気信号に変換する役割を担っている。これらの視細胞は、網膜上において特徴的な空間的配列を形成しており、この配列を 2 次元画像上で表したものを視細胞モザイクと呼ぶ。錐体は、網膜の中心部 (中心窩) で高密度、周辺部では低密度で分布し、さらに周辺部では錐体サイズが大きくなる。桿体は、中心窩には存在せず、中心窩周辺部に最も多く存在し、そのサイズは網膜全域においてほぼ変化がない [1]。また、錐体は波長感度の特性が異なる 3 種類に分類され、ピーク感度波長が長いものから L 錐体、M 錐体、S 錐体と呼ばれる。網膜上における L と M 錐体の存在比は、1.1 : 1 から 16.5 : 1 まで幅広いが、S 錐体の割合は全錐体数の約 5 ~ 10% と非常に少なく、その個人差は少ないことが報告されている [3]。さらに、S 錐体は、中心窩付近には存在しないことや網膜上で一定間隔を空け、高い規則性をもって配置 (非ランダム的に配置) していることがわかってきた [2]。このような視細胞の空間的配列は外界像をどのようにサンプリングするかを左右しており、視覚情報処理に重大な影響を与えると考えられるが、実験的な手法だけでは限界があり、その詳細な影響度は未だ十分に解明されていない。

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数理モデルが構築され、錐体モザイク上での視覚情報処理の解析が可能となった。しかし、用いられた錐体モザイク上の錐体サイズは一様であり、実際の網膜の解剖学的特性を十分に反映したものではなかった。そこで、本研究では、解剖学的特徴をより忠実に再現した視細胞モザイクの自動生成手法の開発と、光応答モデルとの統合を行なった。

2 視細胞モザイクの生成アルゴリズム

本研究で提案するアルゴリズムは、乱数を発生させながら、2 次元平面上に視細胞を逐次的に配置し、視細胞モザイクとして画像出力するものである。視細胞密度や錐体サイズ、S 錐体の配列などをより忠実に再現するために、本研究では、Curcio ら [1][2] による実験的手法によって測定された錐体間距離および細胞サイズの解剖学的データをモデルに組み込む方法を新しく導入した。以下にアルゴリズムの流れを示す。

1. 初期条件の設定

生成する視細胞モザイクの初期条件となる以下のデータを設定する。

- 視細胞モザイクのモデルサイズ (視野直径 [度])
- 錐体数 [個]
- L, M 錐体の存在比

錐体数は任意に設定できるが、網膜上に錐体を配置できるスペースがなくなった時点で、錐体の配置を終了するように設計されている。

2. S 錐体の中心座標の決定

S 錐体を逐次的に配置する。S 錐体の中心座標 (x, y) は三角関数を用いて、式 (1) のように表すことができる。このとき、各 S 錐体の座標パラメータであるラジアン θ と中心窩からの距離 d は一様乱数で決定する。乱数生成には、メルセンヌ・ツイスターを用いた。また、式中のモデルサイズ [px] は、初期条件で設定したモデルサイズ [度] を、1 度 = 750 [px] として変換した値を用いる。

$$\begin{cases} x = d \cdot \cos \theta + \frac{\text{モデルサイズ [px]}}{2} \\ y = d \cdot \sin \theta + \frac{\text{モデルサイズ [px]}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

S 錐体が一定間隔をおきながら分布する非ランダム的な配置を再現するため、S 錐体の中心座標から z_S 以内に新たな S 錐体が配置されないようにする。 $z_S [\mu\text{m}]$ は、S 錐体間距離の解剖学的データを中心窩からの距離 (ecc) の関数で近似したものを用いる。その近似式を式 (2) に示す。

$$z_S = \begin{cases} -20 \times ecc + 31.1 & (0.35 \leq ecc \leq 0.36) \\ 7.43 \times ecc + 21.23 & (0.36 < ecc \leq 3.0) \\ 43.5 & (3.0 < ecc) \end{cases} \quad (2)$$

また、S 錐体が全錐体数に占める割合は網膜の位置によって異なっている [2]。この特徴を再現するために、S 錐体の割合の解剖学的データから近似式を求め、設定したモデルサイズに従って、配置する S 錐体の数を決定した。求めた近似曲線を図 1(a) に示す。

3. L, M 錐体の中心座標の決定

L, M 錐体の中心座標は、S 錐体と同様に乱数を用いて、式 (1) で決定する。その際、各錐体間距離 $z [\mu\text{m}]$ は解剖学的データから求めた近似式に基づいて決定され、新たな錐体が $z [\mu\text{m}]$ 以内に配置されないようにする。このようにすることで、中心窩では高密度、周辺部では低密度になるような錐体密度の特徴を再現している。求めた錐体間距離の近似曲線を図 1(b) に示す。

4. 錐体の中心座標のタイプ (L 錐体または M 錐体) の決定

配置した錐体のタイプを L 錐体または M 錐体のいずれかに決定する。このとき、錐体タイプは、初期条件として設定した L, M 錐体の存在比 (p_L, p_M) と一様乱数 (p_{rand}) を用いて決定される (式 (3))。初期条件を自由に設定することによって、L と M 錐体の存在非の個人差を再現することができる。

$$\text{type}_{\text{cone}} = \begin{cases} M & \text{if } (p_{\text{rand}} < \frac{p_M}{p_L + p_M}) \\ L & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

5. 錐体を円形にする

錐体の中心座標からの距離が r 以下である全ての点を 1 つの錐体とする。その際、 r を錐体半径の解剖学的データから求めた近似式に基づいて、連続的に変化させることで、周辺部に向かうに従って大きくなる錐体サイズの特徴を再現することができる。求めた錐体サイズの近似曲線を図 1(c) に示す。

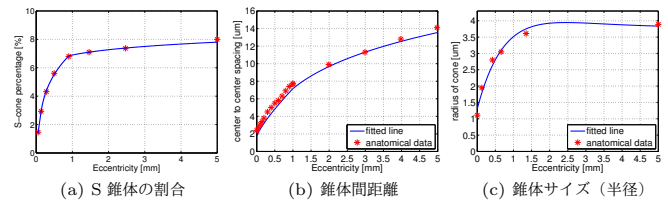


図 1 解剖学的データの近似曲線

6. 桿体の中心座標の決定し、桿体を円形にする

桿体をモザイクの左上 $((x, y) = (0, 0))$ の左上から埋めていく。ただし、桿体の中心座標が錐体と重なる場合は、配置されない。桿体の中心座標からの距離が 1.2 $[\mu\text{m}]$ である全ての点を 1 つの桿体とする。

7. モザイク画像の描画、出力

決定された視細胞タイプに従って、色付けを行い、画像として出力する。L 錐体を赤、M 錐体を緑、S 錐体を青、桿体を黒、細胞が存在しない空間を白に色付けする。

3 光応答モデルとの統合

生成された視細胞モザイク上の各錐体に先行研究 [4] で提案された単一錐体の数理モデルを導入する。この数理モデルには、

入力画像の画素値 (r,g,b) を光刺激 I_n に変換したものが入力される。従来モデルでは、1つの錐体と入力画像中の1ピクセルが1対1の関係にあったが、本モデルでは、錐体のサイズの特徴を考慮したことにより、1つの錐体は入力画像中の複数のピクセルから入力刺激を受け取ることになる。1つの錐体を構成しているピクセル数を n 個とした場合、入力画像の全ピクセルが同時に錐体に入力されると考えれば、入力刺激 I は式 (5) で表される。

$$I_n [\text{td}] = A \times \frac{(s(R,t_{cone}) \times r + s(G,t_{cone}) \times g + s(B,t_{cone}) \times b)}{255} \quad (4)$$

$$I [\text{td}] = \frac{\sum_{k=1}^n I_k}{n} \quad (5)$$

A はスケール係数, r, g, b は画像の RGB 値, $s(R,t_{cone})$, $s(G,t_{cone})$, $s(B,t_{cone})$ はある錐体タイプ (t_{cone}) がもつ各 RGB 値の吸収率, n は1つの錐体を構成するピクセル数である。

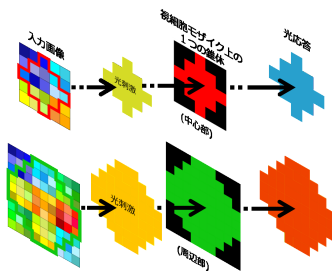


図2 入力画像と視細胞モザイクとの対応付けのイメージ図

4 視細胞モザイクの評価

図3は、従来モデル、本モデル、及び実際の網膜から得られた視細胞モザイクの比較である。左から順に網膜中心部、中心窩からの距離 (ecc) が 0.66[mm], 5[mm] の位置を拡大したものである。従来モデルでは、錐体サイズは網膜全域で一様であるが、本モデルでは周辺部に向かうに従って錐体サイズは大きくなっている。また、錐体の間を埋めるように桿体が分布している。図4(a)に生成された視細胞モザイクから算出した視細胞密度、図4(b)に錐体サイズを示す。解剖学的データと同様にモデル上の錐体密度も中心窩では高密度、周辺部に向かうに従って指数関数的減少を示している。また、桿体密度は周辺部に向かうに従って緩やかに上昇しており、実際の網膜上でみられる錐体の分布の特徴が再現できたといえる。また、錐体サイズも解剖学的データに沿いながら、周辺部では錐体サイズが大きくなるという特徴が再現できた。そして、従来モデルにおけるS錐体はランダムな分布を示していたが(図5(a))、本モデルではS錐体同士が一定以上の間隔を空けて配置しており、より規則性の高い分布を示している(図5(b))。よって、本モデルはS錐体の非ランダムな配列の特徴を良く再現しているといえる。

5 光応答シミュレーション

図6(b)と図6(c)は、それぞれ図6(a)がモザイクの周辺部と中心部に入力された時の応答を示しており、応答が強いほど赤く表示されている。網膜中心部では高密度、周辺部では低密度で存在する錐体密度を再現したことによって、中心部では高い解像度の応答が、周辺部では粗い解像度の応答が見られた。この結果から、錐体密度が視野の解像度に寄与しているという視覚の特徴をモザイク応答上でも再現できることがわかった。

6 まとめ

本研究では、解剖学的特徴をより忠実に再現した視細胞モザイクを生成するため、解剖学的データの近似式をモデルに組み込んだ。その結果、中心部では高密度、周辺部では低密度となる錐体分布の特性、周辺部で高密度となる桿体分布の特性、網膜全体にわたって一様でない錐体サイズの特徴、及び、S錐体の非ラ

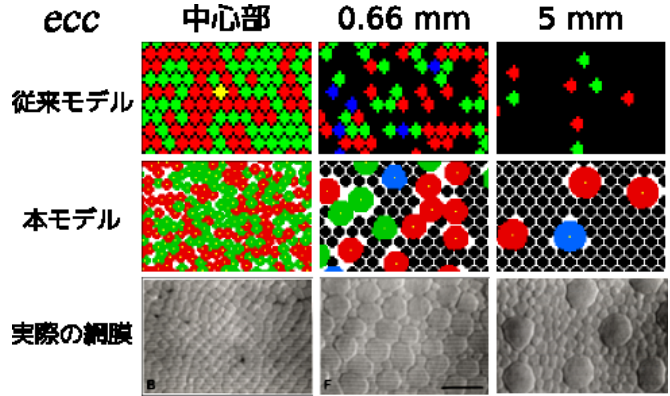


図3 従来モデル、本モデル、及び実際の網膜の視細胞モザイクの比較

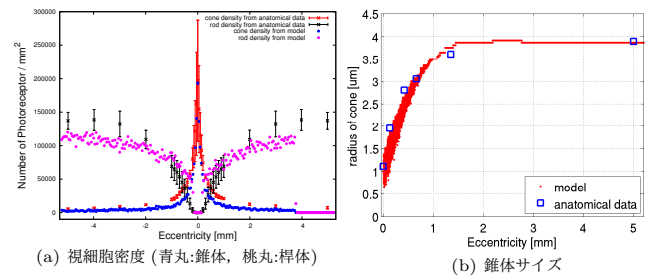


図4 モデルと解剖学的データの比較

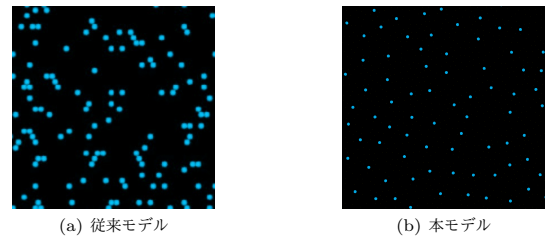


図5 従来モデルと本モデルのS錐体モザイクの比較

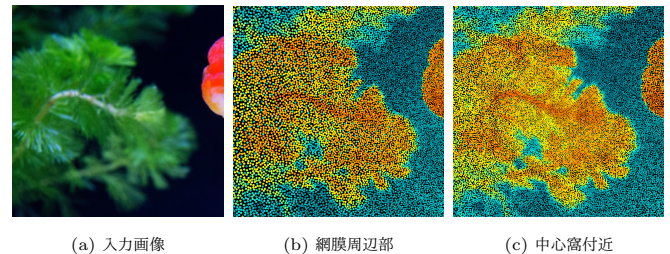


図6 網膜周辺部と中心窩付近における光応答の比較

ンダムの配列特性を再現することができた。また、生成された視細胞モザイクと光応答モデルを統合し、自然画像を入力としたシミュレーションを行なうことによって、モザイク上での情報表現がよりリアリティに予測できるようになった。

今後の課題は、網膜周辺部の桿体密度の精度をさらに向上させることや正常視野角である 160 度までモデルを拡張することが挙げられる。さらに、本モデルを用いて情報量解析を行ない、密度や錐体サイズの特徴が色覚に及ぼす影響を定量的に解析することが挙げられる。

参考文献

- [1] Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE & Hendrickson AE (1990), Journal of Comparative Neurology 292, 497-523
- [2] Curcio CA, Allen KA, Sloan KR, Lerea CL, Hurley JB, Klock IB et al. (1991), Journal of Comparative Neurology 312, 610-624
- [3] Williams D. R. (2011), Vision Research. 51, 1379-1396
- [4] 曾根大樹 (2012), 平成 23 年度修士論文