

解剖学的特性に基づいた錐体モザイクの自動生成手法に関する研究

情報科学科 斎藤 尚美

指導教員：神山 齊己

1 はじめに

ヒトの網膜には桿体視細胞、波長感度特性の異なる 3 種類の錐体視細胞、L 錐体、M 錐体、および、S 錐体が存在している。これらの視細胞には、その分布密度、存在比、大きさ等の解剖学的特性がある。こうした特性は、眼球光学系を経て投影された外界像を受容する際に大きな影響を与えるものと考えられる。

先行研究によって、ポロノイ図を応用することにより、網膜上で錐体サイズの非一様性を再現した錐体モザイク自動生成アルゴリズムが提案された。しかし、生成された錐体モザイク上の錐体の形・大きさ・密度は、実際の錐体の解剖学的特性を十分に反映していない。さらに、桿体が存在する領域は省略されているため、桿体の機能する光条件下のシミュレーションには応用できないという問題点もある。そこで、本研究では、桿体、錐体の解剖学的特性をより忠実に再現した視細胞モザイクの自動生成アルゴリズムとプログラムを開発する。

2 視細胞の解剖学的特性

- 錐体の種類 錐体は異なる波長感度を持ち、波長の長い光を感知しやすいものから L,M,S の 3 種類に分けられる。
- 錐体と桿体の分布密度 網膜の位置によって錐体、桿体の分布密度が異なる (図 1)。錐体は網膜の中心部 (中心窩) に高密度、その周辺部に低密度で分布する。
- L,M,S 錐体の存在比 L,M 錐体の存在比には個人差があるが、S 錐体の存在比には個人差が少なく、全錐体数の約 1 割を占める。
- 錐体と桿体のサイズ 中心窩から遠ざかる程、錐体サイズは大きくなるが (図 2)、桿体サイズはほぼ変化しない。

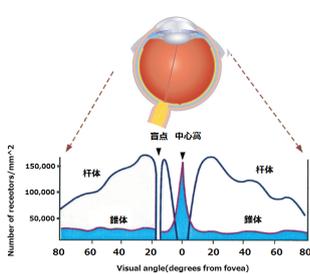


図 1 視細胞の分布密度

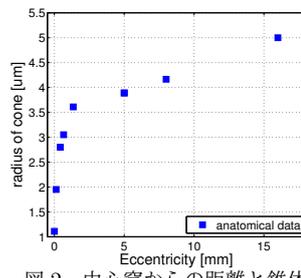


図 2 中心窩からの距離と錐体の半径

3 錐体モザイク自動生成アルゴリズム

本研究では、中心窩では高密度、周辺部では低密度になるように錐体を配置した。また、中心窩からの距離に応じて錐体サイズを変化させることで、解剖学的特性を再現した視細胞モザイクを生成した。以下にそのアルゴリズムを示す。

1. 錐体の配置：錐体の中心座標 (x, y) を三角関数を用いて、式 (1) で表す。このとき、 θ を一様乱数、中心窩からの距離 d を指数分布に従う乱数で決定することで、錐体の配置位置に偏りをもたせる (図 3)。

$$x = d \cdot \cos \theta, \quad y = d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

2. 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一つの錐体とする。錐体サイズに相当する r は、画像中心からの距離 (ecc) に従い、連続的に増加させる (式 (2))。

$$r = 2.16303 \times ecc^{0.239194} + 0.8605 \quad (2)$$

3. 錐体タイプの決定：錐体タイプを L,M,S 錐体のいずれかに決定する。このとき、乱数とそれぞれの存在比を基に決定する。
4. モザイク画像の描画、出力：決定された錐体タイプに従っ

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、及び桿体を黒に色付けする。

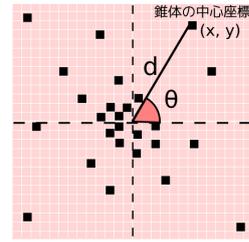


図 3 三角関数を用いた錐体の配置方法の概略図

4 錐体モザイクの評価

図 4 (a)(c)(e) は、生成された錐体モザイクの各位置の拡大図である。また、図 5 に生成された錐体モザイクから算出した錐体の密度、図 6 に錐体サイズを示す。図 5 より、解剖学的データと同様にモデル上の密度も指数関数的減衰を示しており、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、図 6 より、錐体サイズも解剖学的データに沿いながら、周辺部に向かうに従って錐体サイズが大きくなるという特徴が再現できたといえる。

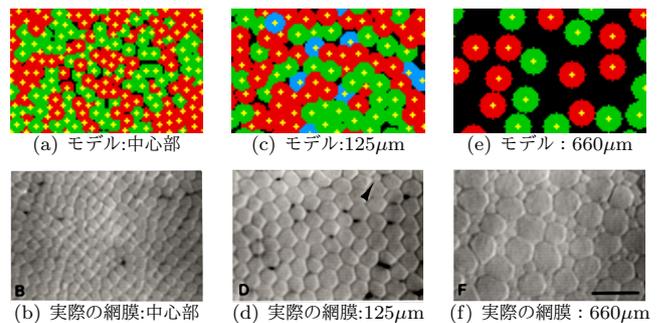


図 4 中心窩からの距離毎のモデル上の錐体と実際の網膜上の錐体の様子

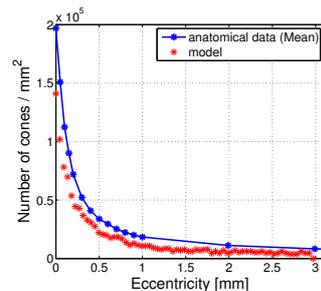


図 5 モデル上とデータ上の錐体密度の比較

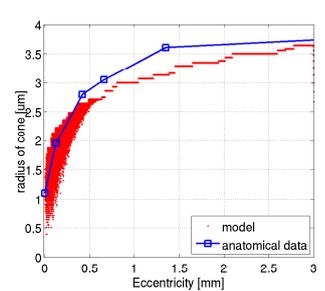


図 6 モデル上とデータ上の錐体サイズの比較

5 まとめ

本研究では、ヒト網膜の解剖学的特性をより忠実に再現した錐体モザイク自動生成モデルの構築を行った。その結果、従来モデルで課題となっていた錐体の形、大きさ、密度を同時に再現することに成功した。今後は、錐体と桿体の両方が配置された視細胞モザイクを生成すること、及び、生成した視細胞モザイクに光応答モデルを導入し、視細胞モザイク上に外界像がどのように投影されるかを解析することが課題である。

参考文献

- [1] Curcio et al(1990), Journal of Comparative Neurology 292, 497-523.
- [2] Eglén SJ.(2012), Computational Systems Neurobiology, 12, 365-385.
- [3] 曾根大樹 (2010), 平成 21 年度卒業論文, 愛知県立大学情報科学部神山研究室
- [4] 早川優子 (2013), 平成 24 年度卒業論文, 愛知県立大学情報科学部神山研究室