

眼光学特性を導入した錐体モザイクモデルに関する研究

熊谷 滯 指導教員：神山 斉己

1 はじめに

網膜上で錐体は、光情報を電気信号へ変換する役割を担っており、波長感度の異なる 3 種類のサブタイプ (L 錐体, M 錐体, S 錐体) の働きに基づいてヒトの脳は色を識別する。これら錐体は、網膜上でサイズや密度分布に特徴がみられる。錐体が網膜上で受容する像は、眼光学系を通過することで収差が生じるため、眼光学特性は錐体の光応答に影響を及ぼしていると考えられる。しかし、眼光学特性が錐体での情報処理にどのような影響を及ぼしているのかは十分明らかになっていない。そこで本研究では、眼光学系モデルと錐体モザイクモデルを統合したモデルを構築し、シミュレーション解析によって収差が視覚情報伝達に及ぼす影響を定量的に解析した。

2 提案モデル

図 1 は本研究で構築した数理モデルであり、眼光学系モデルと錐体モザイクモデルから構成される。眼光学系モデルは眼光学特性を再現しており、収差の影響を受けた網膜像を計算する。錐体モザイクモデルは錐体の解剖学的・生理学的特性を再現しており、錐体の光に対する応答をシミュレーションする。これらを統合することによって、眼に入射した光が眼光学系を通過し、錐体が光応答するまでの過程をシミュレーション可能となる。

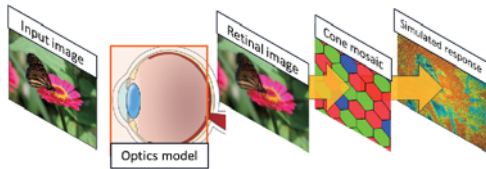


図 1 本研究で構築した眼光学系-錐体モザイクモデル。

2.1 眼光学系モデル

本研究では色覚を担う錐体のシミュレーションを目標としていることから、波長による収差の違いである色収差を再現できる Navarro ら [1] が提案したモデルを用いる。網膜像の計算には、外界像と瞳関数をフーリエ変換後 2 乗して求めた PSF (Point-spread function) を畳み込み積分する。瞳関数は正規化した瞳座標 r の関数として次の式で表される。

$$P(r) = A \left[\exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} (\delta_0 W_{20} r^2 + W_{40} r^4 + W_{60} r^6 + \dots) \right\} \right] \quad (1)$$

$$A = \exp(-0.05 R^2 r^2 \ln 10)$$

ここで、 λ は波長 [m], R は瞳孔半径 [mm], $\delta_0 W_{20}$ は色収差係数, W_{40}, W_{60} は球面収差係数, A は光の透過率を表している。

本研究では、色収差係数 $\delta_0 W_{20}$ を Wandell ら [2] によって定式化された次の式から推定した。図 2(a) に色収差を示す。

$$D(\lambda) = p - \frac{q}{\lambda - c} \quad (2)$$

$$p = 1.7312, q = 0.63346, c = 0.21410$$

また、 W_{40}, W_{60} については、Navarro らが算出した球面収差のデータから推定した。図 2(b) は球面収差を示しており、青は測定データ、赤は多項式フィッティングを行った結果である。推定された球面収差は、球面収差のデータを追従できている。

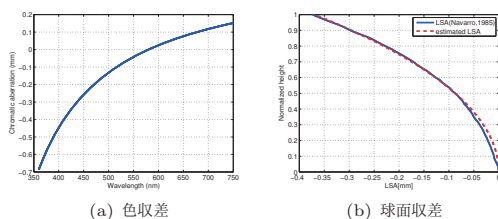


図 2 眼の収差。

2.2 錐体モザイクモデル

錐体には網膜上の分布・サブタイプの存在比などの解剖学的特性と光に対する膜電位応答の生理学的特性がある。錐体モザイクモデルでは、これら特性を再現している。

2.2.1 解剖学的特性の再現

錐体は、網膜上で分布密度、サイズ、錐体サブタイプの存在比に特徴を持つ。L, M 錐体は密でランダム的に分布するが、S 錐体は全錐体の 5~10% 程度であり数が非常に少なく、一定以上の間隔を空けて非ランダム的に分布する。本モデルではこれらの解剖学的特性を再現した。このとき、錐体の特性を忠実に再現するために、実験的測定による錐体間距離 [3], 全錐体数 [3], S 錐体の分布 [4] のデータをモデルに組み込んだ。

2.2.2 生理学的特性の再現

錐体は、外節、内節、シナプス部から構成される。錐体に光刺激が入力されると、外節で電気信号に変換され、内節の膜電位が変化する。本研究では、この特性を再現するために、van Hateren ら [5] の単一錐体の光応答モデルを用いる。

3 結果・考察

3.1 錐体モザイクシミュレーション

図 3 は、視角 1 度の錐体モザイクの中心部に 50×2 [px] の線光源を入力したときの応答と応答した錐体の数を示している。応答が強いほど赤く表示している。L, M, S の括弧内の数は、配置された各錐体の数を示しており、括弧内は各錐体のうち応答した錐体の割合 [%] を表している。

シミュレーション結果より、収差がある場合はその影響で光が広がるため、錐体の光応答の範囲も広がっており、応答する錐体の数が増加していることを確認できる。L 錐体, M 錐体は線状に応答しているが、S 錐体は L 錐体, M 錐体に比べて数が少ないため、疎らに応答している。しかし、収差があるとき 4.9% の S 錐体が応答している。L 錐体 3.7%, M 錐体 6.6% と比較して、S 錐体も光に対して十分応答していると考えられる。

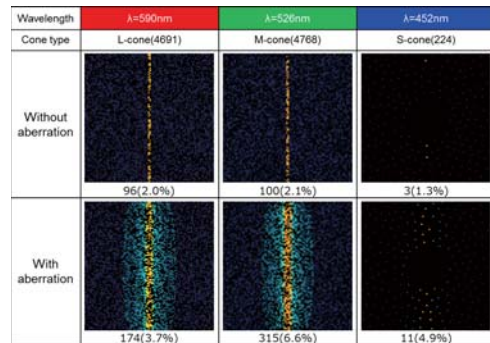


図 3 光応答の結果と応答した錐体の数。

3.2 相互情報量解析

提案モデルを用いることにより、光が眼光学系を通過し、錐体で光応答するまでの過程をシミュレーションすることができる。ここでは、相互情報量を用いて、収差が錐体モザイクでの情報処理に及ぼす影響を解析する。相互情報量の計算方法及び解析結果について説明する。

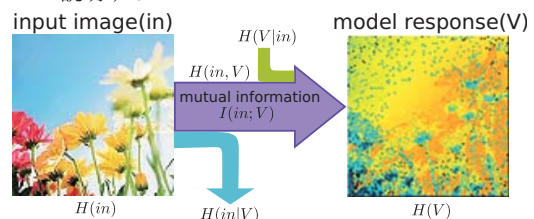


図 4 相互情報量のイメージ [6]。

3.2.1 計算方法

本研究では、入力刺激強度とモデル応答の相互情報量を求め、入力の情報がどの程度錐体モザイクに伝達されたか解析する。

1. モデルシミュレーションを行う。入力画像による刺激 (in) をモデルに入力すると膜電位応答 (V) が出力される。
2. 錐体モザイクモデルへの入力刺激強度 (in) と膜電位応答の大きさ (V) をビン数 30 でレベル分けする。
3. 入力刺激強度の配列 (in_x)、モデル応答の配列 (V_y) からカウントした二次元ヒストグラムを $hist(in_x, V_y)$ を作成する。
4. 同時確率 $p(in_i \cap V_j)$ 、周辺確率 $p(in_i)$ を次の式から計算する。

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

$$p(in_i) = \sum_{j=1}^{bin} p(in_i \cap V_j), p(V_j) = \sum_{i=1}^{bin} p(in_i \cap V_j) \quad (4)$$

5. 次の式を用いて相互情報量 $I(in; V)$ を計算する。

$$I(in; V) = \sum_{i=1}^{bin} \sum_{j=1}^{bin} p(in_i \cap V_j) \log_2 \frac{p(in_i \cap V_j)}{p(in_i)p(V_j)} \quad (5)$$

3.2.2 解析結果

S 錐体は中心窩 (中心から 0.05[mm] 以内) には存在しない、一定 (平均 30[mm]) 以上の間隔を空けて分布している (非ランダム配列)。S 錐体の分布特徴が錐体での情報伝達に与える影響を解析するために、視角 5 度、S 錐体の配列特徴が異なる 4 種類の S 錐体モザイクを用いる。図 5 上段は生成した S 錐体モザイクの中心部の拡大図であり、中心窩への S 錐体の分布は、(a)(c) は存在しない場合、(b)(d) は存在する場合である。S 錐体の配列は、(a)(b) では非ランダム、(c)(d) ではランダムである。図 5 下段は、 3000×3000 [px] の画像上に表現された 10×3000 [px]、波長 452[nm] の線光源を網膜中心部に入力したときの正規化した相互情報量である。W/o は収差なし (Without aberrations)、W は収差あり (With aberrations) を示している。

収差の有無 (W/o, W) を比較すると、収差があるとき (W) 平均して 0.5 情報量が低下している。収差の影響で網膜像はぼやけるため、応答する錐体数は増加するが、伝達される外界情報が減少したことを示している。収差がある場合における S 錐体の分布特徴について考察する。S 錐体が中心窩に存在する場合 ((a)(c)) と存在しない場合 ((b)(d)) を比較すると、S 錐体が中心窩に存在しないときは、存在するときに比べて平均して 0.0285 情報量が高くなっている。S 錐体が中心窩に存在しない特性は、収差による情報量低下を約 2.9% 抑制することがわかった。S 錐体の配列が非ランダム ((a)(b)) とランダム ((c)(d)) を比較すると、非ランダムな配列のときは、ランダムな配列のときに比べて平均して 0.0689 情報量が高くなっている。S 錐体の配列が非ランダムな配列は、収差による情報量低下を 6.9% 抑制することがわかった。このことから、収差の影響で情報量は低下するが、S 錐体が中心窩に存在しない特性と S 錐体の非ランダム配列によって効率的に情報伝達していることが分かった。

次に錐体サイズについて評価する。錐体サイズには中心窩から遠ざかる程大きくなるという特徴がある。この特徴が錐体での情報伝達にどのような影響を与えるか解析するために、視角 5 度、錐体サイズが異なる 2 種類の錐体モザイクを用いる。図 6 上段は生成した S 錐体モザイクの周辺部を示している。(a) は錐体サイズが非一様な錐体モザイクであり、周辺部に向かうに従って錐体サイズが大きくなる。(b) は錐体サイズが一定 (直径 1.5[μ m]) な錐体モザイクである。図 6 下段は、 3000×3000 [px] の画像上に表現された 10×3000 [px]、波長 526[nm] の線光源を網膜中心部に入力したときの相互情報量である。横軸は網膜中心窩からの距離 (Eccentricity[deg])、縦軸は正規化した情報量を示している。

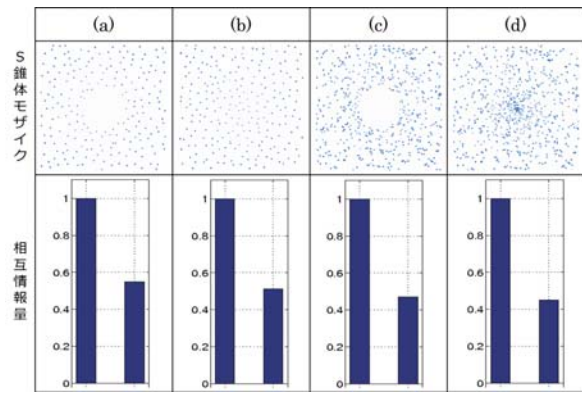


図 5 S 錐体モザイクと相互情報量

図 6 より、網膜中心部で最も情報量が高く、周辺部に向かうに従って情報量が低下する傾向を確認できる。周辺部では錐体密度が低くなり、錐体が受け取る情報が減少するため、結果として情報量が低下したと考えられる。網膜中心窩からの距離 (Eccentricity) 2[deg] の情報量を比較すると、(a) 錐体サイズ非一様なときは 0.1(W/o), 0.2(W), (b) 錐体サイズが一定なときは 0.1(W/o), 0.05(W) である。収差がある場合 (W) では、錐体サイズが非一様な場合の方が情報量が高くなっており、錐体サイズが周辺部で大きくなることによってより多くの情報を受け取っている。この結果から、周辺部では錐体密度が低いために情報量は低下するが、錐体サイズが大きくなることによって情報量低下を抑制していることが分かった。

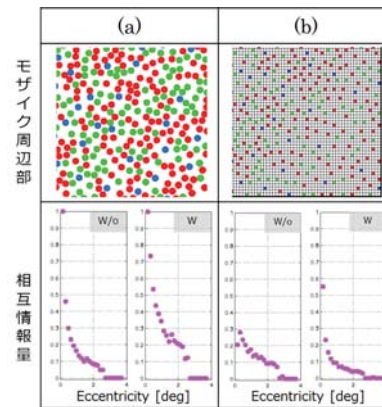


図 6 錐体モザイク周辺部と相互情報量

4 まとめ

本研究では、視覚情報処理過程をより詳細に解析するために、錐体モザイクモデルに眼光学系モデルを導入し、錐体による情報処理以前の影響を組み込んだリアルスティックなモデルを構築した。構築した数理モデルによって、眼光学特性、錐体の解剖学的・生理学的特性を再現することができた。モデルを用いたシミュレーションの結果、収差は錐体での光応答に影響を及ぼしており、S 錐体の分布特徴はその影響を低減することが分かった。また周辺視では、錐体サイズが大きくなることによって錐体密度が低くても情報を効率的に受け取っていることがわかった。

参考文献

- [1] Navarro R, et al. (1985). JOSA A2, 2(8), 1273–1280.
- [2] Wandell BA, et al. (1994). JOSA A, 11(12), 3113–3122.
- [3] Curcio CA, et al. (1990). JCN, 292(4), 497–523.
- [4] Curcio CA, et al. (1991). JCN, 312(4), 610–624.
- [5] van Hateren JH, et al. (2007). JOV, 7(4), 1–11.
- [6] 篠原広行, 他. (2006). 断層映像研究会雑誌, 33(3), 154–160.
- [7] 曾根大樹 (2012). 平成 23 年度修士論文.
- [8] 斎藤尚美 (2016). 平成 27 年度修士論文.