

# 微小眼球運動による視覚情報処理能力向上に関する研究

稲垣 圭一郎

中部大学工学部ロボット理工学科

## 1. はじめに

視覚系では、最適な認知や行動のために、非常に多くの情報がセンシングされ処理されている。外界情報をセンシングするためには、大別してサッカードと注視という2つの眼球運動が伴う。すなわち、サッカードにより外界の特徴的な対象へ視線をジャンプさせ、注視によりシーンのサンプリングを行う。これらを繰り返し行うことで、外界シーンの特徴点をスキャンし、得られた情報に基づいて認知・認識を行う。

注視には、マイクロサッカード、ドリフト、トレマーという微小な振動性の眼球運動(微小眼球運動)が付随することが知られている[1]。従来、微小眼球運動には、null-point への視線の調整[2]、継続的な注視による網膜固定の回避[3]、微小物体に対する視えの向上[4]などの機能があるという報告がある。また、外界シーンの光情報が電気信号に変換される網膜の視細胞層は、Cone Mosaic と呼ばれるスパースな錐体視細胞層配置を構成している[5]。しかしながら、我々は Cone Mosaic のスパースな構造で電気信号に変換された外界像からクリアな外界を知覚している。こうした外界シーンのサンプリングや認知において、微小眼球運動や視細胞層のモザイク構造が与える影響については、その詳細の理解は未だ進んでいない。

我々は、これまでのシミュレーション研究で、微小眼球運動により Cone Mosaic によりサンプルされるスパースな応答が改善されることや、静止画像内に存在するエッジに対応する応答が強化されることも確認している。本研究では、外界静止画シーンの注視時において、微小眼球運動が視細胞層の情報処理に与える影響を定量的に評価するため、相互情報量を用いて網膜視細胞層の応答を評価した。

## 2. 眼球運動－眼光学－網膜視細胞モデル

図1に構築した視覚系数理モデルの概要を示す。本研究では、眼球運動系(脳幹)、眼光学系、網膜視細胞層からなる視覚系数理モデルを構築した。視覚系数理モデルの構築に際して、まず視覚系脳部位ごとに解剖ならびに生理学的知見に基づく詳細なサブモデルを構築した。構築した数理モデル

は、クラスタ PC および「京」で高速な並列シミュレーションを行うため、高並列化を施したのち、PLATO[6]と呼ばれるソフトウェアにより統合した。なお、本モデルの概要については、前年度の報告ならびに文献[7]に譲る。

## 3. 相互情報量による評価

Garrigan ら、および曾根と神山は、情報量という指標を用いて、視細胞層が構成する Cone Mosaic に反映される外界情報の定量的な評価を報告している[5],[8]。本研究においても、静止画シーン注視時における視細胞層応答を評価するため、情報量を指標として用いる。静止画像 ( $E_{in}$ ) に対するある時刻の Cone Mosaic の応答の相互情報量 ( $I_R$ ) は、次のように算出した。

$$I_R(S(t), E_{in}) = -\sum_{s_i \in S} p(s_i(t)) \log_2 [p(s_i(t))] \quad (1)$$

式(1)において、 $s_i$  は錐体視細胞の膜電位である。なお、相互情報量にはノイズ情報も寄与するが、本研究では同情報がごく小さいとして考慮していない。

## 4. モデルシミュレーション

構築した統合モデルにより、人物像や風景からなる8つの静止画シーンに対して、それらを4秒間注視している状況を微小眼球運動の有無2つの条件でシミュレートした。それぞれのシミュレーション時間は、静止画シーンに対する視細胞層応答が変化しなくなる4秒間とした。各サブモデルのシミュレーションステップは、眼球運動モデル：0.1ms、眼光学系モデル：30ms、視細胞モデル：30ms とした。図2に、静止画シーンを微小眼球運動有り(A)と無し(B)の条件で4秒間注視した際の視細胞層

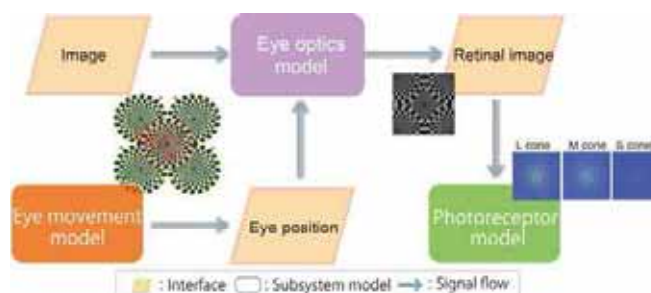


図1 PLATOにより眼球運動系、眼光学系、網膜視細胞層の各数理モデルを統合して構築した数理モデルと各数理モデルの出力



図 2 微小眼球運動有り(A), 無し(B)の 4 秒間の注視時の視細胞層応答とそれらの差分(C),ならびに入力として用いた静止画シーン(D).

応答とそれらの差分画像(C)を示す. なお, 4 秒間の注視時の視細胞層応答は, 加算平均画像として計算した. さらに, それらの差分を計算することで, 微小眼球運動の寄与を評価した. 微小眼球運動が伴うことにより, Cone Mosaic のスパースな応答が低減することや, 静止画像内に存在するエッジ部分で応答が強くなることが確認できる. 微小眼球運動が無い場合, スパースな応答の改善ならびにエッジに対する応答は増加しなかった.

図 3 は, 8 つの静止画シーンを注視している際の, 垂直および水平方向の微小眼球運動の状況と, 視細胞層応答に反映される静止画シーンの情報量をまとめたものである. 微小眼球運動が伴うことで, 情報量が増加していくことが確認できる. 一方で, 微小眼球運動が無い注視の場合は, 平坦域まで情報量が減衰することが確認できる.

本研究で再現している微小眼球運動は, マイクロサッカードとドリフトを含んでいる. 微小眼球運動による情報量変化は, ドリフトが生じている区間では, 滑らかに増加し, マイクロサッカードが生じた際に大きく増加していることがわかる. こうした微小眼球運動による情報量の増加は, ドリフトにより, Cone Mosaic に見られるスパースな応答が平滑化され, マイクロサッカードによって, エッジなどの情報が強化された結果であると考えられる.

## 5. まとめ

本研究では, 微小眼球運動が網膜視細胞層の情報処理に与える影響を評価するため, 相互情報量による定量評価を試みた. 静止画シーンを微小眼球運動の有無 2 つの条件で 4 秒間注視した際の視細胞層応答を評価したところ, 微小眼球運動により, 情報量が増加することが明らかになった. このとき,

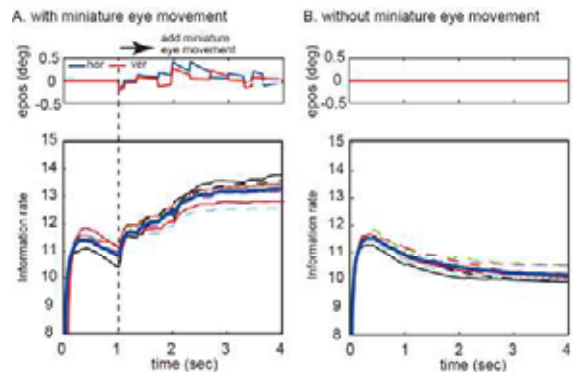


図 3 注視時の水平方向(青)および垂直方向(赤)の眼球運動(上段)と静止画シーン注視時の視細胞層応答に反映される情報量の変化(A: 微小眼球運動有り, B: 微小眼球運動無し, 太線は, 平均値を示す(N=8)). 縦の破線は, 微小眼球運動を付加したタイミングである.

情報量はドリフトが生じている区間では滑らかに増加し, マイクロサッカードが生じた際には大きく増加していた. こうした情報量解析より, 微小眼球運動には, ドリフトによる平滑化と, マイクロサッカードによるエッジ強化の 2 つの機能があることが示唆された.

## 6. 参考文献

- [1] H.B. Barlow, "Eye movements during fixation." *Journal of Neurophysiology*, vol.116, no.3, pp.290-306, 1952.
- [2] T.N. Cornsweet, "Determination of the stimuli for involuntary drifts and saccadic eye movements." *Journal of the Optical Society of America*, vol.46, no.11, pp.987-993, 1956.
- [3] S. Martinez-Conde, S.L. Macknik, X.G. Troncoso, T.A. Dyar, "Microsaccades counteract visual fading during fixation." *Neuron*, vol.49, no.2, pp.297-305, 2006.
- [4] H.K. Ko, M. Poletti, M. Rucci, "Microsaccades precisely relocate gaze in a high visual acuity task." *Nature Neuroscience*, vol.13, pp.1549-1553, 2010.
- [5] 曾根大樹, 神山齊己, "霊長類網膜錐体モザイクの大規模数理モデル", *信学技報*, NC2011-84, pp.1-6, 2011.
- [6] T. Kannon, K. Inagaki, N.L. Kamiji, K. Makimura, S. Usui, "PLATO: Data-oriented approach to collaborative large-scale brain system modeling.", *Neural Networks*, vol.24, no.9, pp.918-926, 2011.
- [7] 稲垣圭一郎, 観音隆幸, 神山齊己, 石原彰人, 白井支朗, "微小眼球運動を伴う網膜視細胞層応答の情報量評価", *Neural Networks*, vol.24, no.9, pp.918-926, 2011.
- [8] P. Garrigan, C.P. Ratliff, J.M. Klein, P. Sterling, D.H. Brainard, V. Balasubramanian, "Design of a trichromatic cone array.", *PLoS Comput. Biol.*, vol.12, no.6, pp.1-17, 2010.