

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。これらを繰り返すことで、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。しかしながら、こうした機能がどのようなメカニズムで実現されているかは、未だ明らかでない。本研究では、外界静止画シーンの注視時における微小眼球運動が視細胞層の情報処理に与える影響を探るため、眼球運動系-眼光学系-網膜視細胞層に至る神経経路を解剖ならびに生理学的知見に基づいて陽に記述した視覚数理解モデルを構築した。構築した数理解モデルにより、複数のシーンを注視しているときの微小眼球運動をシミュレートし、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に構築した視覚数理解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数理解モデルを構築した。視覚数理解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。構築した数理解モデルは、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[5]と呼ばれるソフトウェアにより統合した。PLATOによるモデル統合では、MPI ベースのモデル接続インタフェースを用いており、統合後のモデルにおいても並列化性能を保持したまま並

列シミュレーションが可能である。また、統合モデルのシミュレーションは、専用のエージェントにより実施される。このとき MPI ベースのインタフェースで、接続されたすべてのサブモデルのシミュレーションステップや、データ I/O のタイミング、モデルの進行状況、出力データの保存などが管理される。したがって、PLATO では、統合した全モデルが1つの大規模なシステムとしてシミュレーションされることとなる。以下に、モデル統合に用いたサブモデルの概要を示す。なお、それぞれのサブモデルの詳細については、各文献に譲る。

・眼球運動系サブモデル

眼球運動系の数理解モデルでは、脳幹の神経回路網をコンダクタンススペースの細胞モデルにより記述し構築した[6]。構築したモデルでは、物体注視時に生じるマイクロサッカード、ドリフトといった微小眼球運動ならびに視野上の物体を反射的に捉えるサッカードの生成を可能としている。

・眼光学系サブモデル

眼光学系の数理解モデルは、P. Artal が提案しているモデルを基に、眼球形状の特性、瞳孔系の特性などの知見を追加し構築した[7]。構築したモデルは、視野直径 60 度に相当する 1000x1000pixel の詳細な網膜像の生成を可能としている。

・網膜視細胞層サブモデル

網膜視細胞層は、視野直径 60 度、約 3600 万個の細胞から構成されるモデルとして構築した[8]。構築した視細胞層モデルのうち、錐体細胞は 150

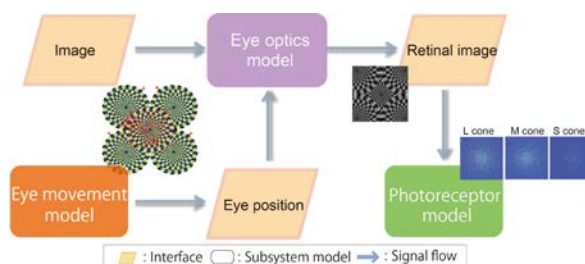


図1 PLATOにより眼球運動系、眼光学系、網膜視細胞層の各数理解モデルを統合して構築した数理解モデルと各数理解モデルの出力

万個に相当する。L型、M型、S型の3種類の錐体視細胞の配置ならびに存在比を解剖学的知見に基づいて詳細にモデル化し、Cone Mosaicを再現した。また、それら錐体視細胞の光応答についても、生理学的な知見に基づいて記述した。

3. 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。シミュレーションには、理化学研究所のPCクラスター(RICC: RIKEN Integrated Cluster of Clusters)ならびに「京」を用いた。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していることが確認できる。特に錐体が多く存在する中心窩付近においては、スパースな応答は大きく改善していることがわかる。また、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の増加は確認されなかった。

4. 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、眼球運動系、眼光学系、網膜視細胞層を生理学・解剖学的な知見に基づいて詳細に記述した数理モデルを構築した。それら構築したサブモデルを、モデル統合およびそのシミュレーションを可能とするPLATOと呼ばれるソフトウェアにより統合することで、詳細な眼球運動ならびに眼光学系が反映された網膜視細胞層応答を再現した。このようにして構築した数理モデルを用いて、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シミュレートした。その結果、微小眼球運動が伴うことで、視細胞層の特異的な細胞配置であるCone Mosaicに見られるスパースさが低減し、さらにエッジ成分に対する応答が増加する



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).

ことが確認された。今後の課題としては、微小眼球運動の方向と強調されるエッジ情報との関連性を調べるとともに、これに伴う情報量の変化を解析する予定である。

5. 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] 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.
- [6] K. Inagaki, Y. Hirata, S. Usui, "A model-based theory in the signal transformation for the microsaccade generation.", *Neural Networks*, vol.24, 9, pp.990-997, 2011.
- [7] T. Kannon, S. Usui, "Generating realistic retinal image for whole visual system modeling.", *BMC Neuroscience*, vol.12, suppl.1, p.348, 2011.
- [8] 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.