

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07146

研究課題名(和文) 電気感覚系における情報処理機構のシステムの理解を目指す理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on understanding the information processing mechanism in electrosensory system as a system

研究代表者

榎森 与志喜 (KASHIMORI, Yoshiki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：70233707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電気感覚による物体形状識別を対象に、刺激形態、神経コーディングについて研究した。以下の成果を得た。(1) 計算効率化を図る目的で、GPGPU計算に対してその計算能力や単精度計算の精度を調べた。様々な神経モデル計算に対してGPGPUの計算時間や単精度計算の有用性を示した。(2) 弱電気魚の電場計算から、物体の形の差異は物体の連続的な回転による電場歪みの最大振幅や広がりによって反映されることが分かった。(3) 受容器や後脳での物体形状の神経コーディングについては、物体の形状情報は物体が回転し元の形に戻る直前の発火パターンによってコードされることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We studied the stimulus geometry and neural coding in discrimination of object's shapes in electrosensory system. We investigated the computation ability of a GPGPU method and the accuracy of single-precision calculations. The GPGPU computation provides several advantages in reduction of computation time and accuracy of single-precision calculations. We also found from the calculation of electric field around a weakly electric fish that the difference between object's shapes is represented by the difference in the maximum amplitude and width of the electric-field modulations caused by object rotation. Furthermore, we found that in receptors and the hindbrain object information is encoded in the firing patterns just before an object returns to the original form in the rotation.

研究分野：計算神経科学

キーワード：神経科学 電気感覚システム 数理モデル 大規模並列計算 情報処理機構

1. 研究開始当初の背景

生物の外界認識は、感覚認知と行動を通して行われる。動物の行動に関する実験的研究は、大きくは次の2つの手法に分類される。一つは、刺激とそれに対応する行動に関する実験的研究である。他方は、刺激に対応する脳の各部位での応答を調べる生理学の実験である。しかし、感覚情報と行動に関する運動情報が脳内でどのように一体化して処理されているのかはまだ不明な点が多い。これらの感覚と行動の統一的理解にはギャップがあり、感覚と行動を結ぶシステム的研究が必要である。

2. 研究の目的

感覚と行動のシステム的理解を目指して、本研究では電気感覚系の物体知覚の問題に取り組む。弱電気魚の電気感覚の研究については、W. Heiligenberg の混信回避行動に関する先駆的な研究はあるが[1]、物体の定位行動については、まだ理解が進んでいない。本研究では、電気感覚系による物体の形状知覚の神経メカニズムとその運動との関係について研究する。

3. 研究の方法

研究の方法については、以下のとおりである。

(1) 弱電気魚の周囲の電場計算

弱電気魚が受ける正確な電場の刺激形態を知るために、水槽内の魚と魚が持つ発電器官、周囲の物体に対する電場の数値モデルを作成した。このモデルを有限要素法で解き、魚の体表面の正確な電場を計算した。

(2) GPGPU 計算システムの構築と評価

有限要素法では大規模計算が必要なため計算を効率化する目的で、GPGPU 計算システムを構築した。また、後の神経システムの計算への応用を考え、様々な神経モデルに対する計算能力の評価を行った。

(3) 受容器、後脳のモデル作成

物体の形状(円、正方形、正三角形、長方形、楕円)のちがいがどのように受容器や後脳の神経ネットワークによりコードされているか調べるため、受容器と後脳の神経モデルを作成した。受容器に関しては、Brandman et al. のモデル[2]に基づいて作成した。また、後脳については、Doiron et al. [3] のモデルに基づいて作成した。

4. 研究成果

(1) GPGPU 計算システムの構築と計算能力の評価

本研究での大規模計算に備えて、GPGPU 計算システムを構築し、4つのニューロンモデル(Leaky integrate-and-fire (LIF) model, Izhikevich model, Hodgkin-Huxley (H-H) model, 2-compartment model) について、ニューロン数が $2^8 - 2^{20}$ の集団に対して

Open MP と GPGPU の計算時間を比較した。以下のことが分かった。

- (a) 比較的ニューロン数が少ない ($N < 2^{11}$) 場合は、Open MP の方が計算時間が短かったが、それ以上のニューロン数では GPGPU の方が計算時間が短かった(図1)。ニューロン数が増えれば、GPGPU 計算の方が計算時間に関して効率的である。
- (b) GPGPU のデータ移動の計算時間に対する効果を調べるため、データ移動を含む場合と含まない場合の時間を比較した。その結果、データ移動がない場合は計算時間が数倍短くなった。これは、GPGPU 計算においてデータ移動プロセスが計算時間短縮に大きく影響することを示している。

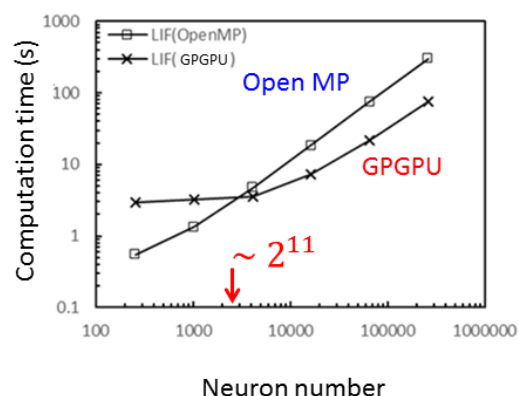


図1. GPGPU と Open MP の LIF neuron model に対する計算時間の比較。

(2) GPGPU 計算による単精度計算の精度評価
GPGPU 計算は標準的に単精度計算に適した設計になっており、ニューロンの計算で単精度計算がどの程度有効であるかは、計算効率や精度において重要な問題である。本研究では、(1)で述べた系に対して単精度と倍精度計算を行いその結果を比較した。得られた結果は、数値的に単精度と倍精度の誤差は有意なものではなく、ニューロンの応答にはほとんど影響しないものである。また、発火率やスパイク間隔ヒストグラムについても両者の精度計算に差は生じなかった。このことは、ニューラルネットワークの計算では GPGPU を用いた単精度計算が計算時間と精度の点で有効な方法であることを示している。

(3) 物体の形状情報を表す電場歪みの特徴
弱電気魚が物体形状をどのように識別しているか、そのメカニズムを探るため、水槽内の弱電気魚の環境に対してその周囲の電場を有限要素法により計算した。正方形物体に対しては既に我々はその計算法を提案している[4]。任意の形を持つ図形に関しては、空間のメッシュの切り方が一様では精度が得られないため、自己組織的な空間分割法を

使用した。

この計算によって以下のことが分かった。

- (a) 異なる形状（円、正方形、正三角形、長方形、楕円）を持つ物体の電氣的イメージ（魚の体表面で形成される電圧変調）は、それらの形に関係なくガウス型の変調を示す。このことは、魚は単一のイメージでは形状の識別ができないことを意味する。
- (b) 正方形と正三角形は、魚の体表面からの距離が4cmより大きくなると電圧変調の最大振幅は著しく減少する。このことは、物体の“電氣的視界”が4cm程度であるという実験結果と一致する[5]。
- (c) 形状の違いは、物体を連続的に回転させたときの電場のガウス変調の最大振幅と半値幅の変化にみられる。図2に示すとおり、正方形では、側方距離が10mmでは”convex-concave”型を示すが、距離が遠くなると60°までは線形の依存性を示す。一方、三角形では、最大振幅の角度依存性は、距離が遠くなって”convex-concave”型を示す(図3)。ガウス変調の半値幅については正方形と正三角形では全体的に類似しているが、形が元に戻る前の急激な増加（突起）が生じる角度に物体形状の特徴が表れる。

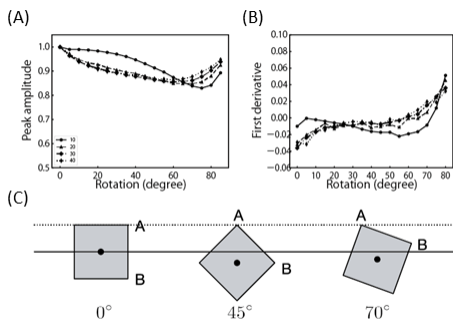


図2 正方形の回転に伴う電場の最大振幅変化(A)、その一次微分(B)、物体回転の配置(C)

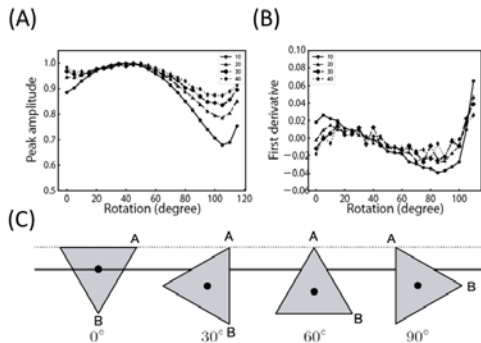


図3 三角形の回転に伴う電場の最大振幅変化(A)、その一次微分(B)、物体回転の配置(C)

(4) 受容器における物体形状の神経コーディング

電場計算で得られたデータに基づき、物体を角速度 $5\pi/12$ [rad/s] で回転させた入力データを各受容器に対して作成し、正三角形、正方形に対する応答を調べた。スパイクはトニックパターンを示し入力の振幅変化を忠実にコードした。図4に示されるように、物体が一回転したとき、受容器全体の発火率の時間的変化は、図形に特徴的なパターンを示した。正方形では、 100° ずつの角度範囲で後半の $50^\circ - 100^\circ$ ごとに広い範囲の発火増加を示した。一方、三角形では、約 100° の整数倍のところに特徴的なピークが現れた。スパイク間隔の統計分布には大きな差異はなかった。

(5) 後脳における物体形状の神経コーディング

三角形と正方形に対して、回転に伴う後脳の神経ネットワークモデルに対する応答を調べた。後脳ニューロンは、受容器に対してON中心-OFF 周辺の結合を有している。また、スパイクはバーストパターンを示す。図5に発火率の時間的変化を示す。三角形については大きな違いはないが、正方形では、ピークのコントラストが増加し、三角形との違いが明確になっている。後脳では受容器で捉えた発火特性のコントラストを上げ、物体の形状情報の差をより明確にしている。

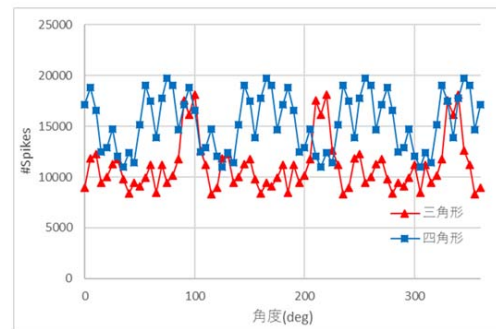


図4 受容器の物体回転に伴う発火率の時間的変化

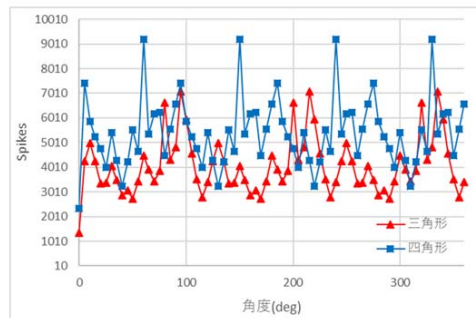


図5 後脳ニューロンの物体回転に伴う発火率の時間的変化

<引用文献>

1. W. Heiligenberg, *Neural Nets in Electric Fish*, MIT Press Cambridge, 1991
2. Brandman, R., Nelson ME., A simple model of long-term spike train regularization, *Neural Comput*, Vol. 14, pp. 1575-1597, 2002
3. Doiron, B et al., Ghostbursting: A novel neuronal burst mechanism, *J Comput Neurosci*, vol. 12, pp. 5-25, 2002
4. K. Fujita, Y. Kashimori, Modeling the electric image produced by objects with complex impedance in weakly electric fish, *Biol Cybern*, Vol. 103, pp. 105-118, 2010
5. von der Emde et al., 3-dimensional scene perception during active electrolocation in a weakly electric fish, *Front Behav Neurosci*, Vol. 4, Article 26, pp. 1-13
DOI:10.3389/fnbeh.2010.00026

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

1. K. Fujita, S. Okuno, Y. Kashimori, Evaluation of the computer efficacy in GPU-accelerated simulation of spiking neurons, *Computation*, in press, 査読有, 2018,
<https://doi.org/10.1007/s00607-018-0590-0>
2. S. Okuno, K. Fujita, Y. Kashimori, Computational efficacy of GPGPU-accelerated simulation for various neuron models, *Lecture Notes in Computer Science*, 査読有, vol. 10638, 2017, pp.802-809,
https://doi.org/10.1007/978-3-319-70139-4_81
3. K. Fujita, Y. Kashimori, Neural representation of object's shape at the electroreceptor afferents on electrolocation, *Lecture Notes in Computer Science*, 査読有, vol. 10636, 2017, pp.877-884,
https://doi.org/10.1007/978-3-319-70090-8_89

4. T. Shimemura, K. Fujita, Y. Kashimori, A neural mechanism of taste perception modulated by odor information, *Chemical Senses*, 査読有, vol. 41, No. 7, 2016, pp.579-589,
<https://doi.org/10.1093/chemse/bjw062>
5. A. Kamiyama, K. Fujita, Y. Kashimori, A neural mechanism of dynamic gating of task-relevant information by top-down influence in primary visual cortex, *BioSystems*, 査読有, vol. 150, 2016, pp. 138-148,
<https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2016.09.009>
6. K. Fujita, Y. Kashimori, GPU-accelerated simulations of an electric stimulation and neural activities in electrolocation, *Lecture Notes in Computer Science*, 査読有, vol. 9950, 2016, pp.213-220,
https://doi.org/10.1007/978-3-319-46681-1_26

[学会発表] (計 14件)

1. 藤田一寿、榎森与志喜、神経細胞のシミュレーションにおける膜電位のダイナミックスに与える浮動小数点数の精度の影響、ニューロコンピューティング研究会、東京、2018
2. R. Tani, S. Yano, Y. Kashimori, Top-down influence on V1 responses on perceptual behavior by reinforcement learning. The 6th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer, Miyagi, Sendai, 2018
3. 奥野舜、藤田一寿、榎森与志喜、弱電気魚の電気定位における物体形状の神経コーディング、信学技報 (IEICE Technical Report), Vol 117, 2017, pp.41-46
4. 谷遼、矢野史郎、榎森与志喜、知覚学習の適応行動に伴う一次視覚野へのトップダウン効果の生成機構、信学技報 (IEICE Technical Report), Vol 117, 2017, pp.23-38
5. K. Fujita, Y. Kashimori, What features of an electric image received by a weakly electric fish represent the shape of an object? The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2017
6. S. Okuno, Y. Kashimori, K. Fujita, Evaluation of computing speed and accuracy of a GPGPU-simulation method for large -scale spiking neural

- networks. The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2017
7. 武井健児、榎森与志喜、味嗜好性行動における眼窩前頭皮質と扁桃体の機能的役割、味と匂い学会, 2017
 8. R. Tani, S. Yano, Y. Kashimori, A neural mechanism of gating of task-relevant information by cross-coupling of brain rhythms, The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2017
 9. Y. Kashimori, Associated dynamics between inferior temporal and prefrontal cortices in categorization task, The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2017
 10. K. Fujita, Y. Kashimori, GPU-accelerated simulations of an electric stimulus and neural activities in electrolocation, The 26th International Conference of Neural Information Processing (ICONIP 2016), 2016
 11. K. Fujita, Y. Kashimori, GPU-accelerated calculation of an electric field generated by an electric fish and neural activities of the electroreceptor system, Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2016), 2016
 12. 藤田一寿、榎森与志喜、GPU を用いた電気感覚刺激の計算の高速化、第39回日本神経科学大会、2016
 13. 奥野舜、藤田一寿、榎森与志喜、GPGPUによる様々なニューロンモデルのシミュレーションの高速化と計算精度の評価、ニューロコンピューティング研究会、2016
 14. 藤田一寿、阿部祐貴、小野寺洸哉、榎森与志喜、GPGPUによる刺激から神経活動までを再現するシミュレーションの高速化、ニューロコンピューティング研究会、2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎森 与志喜 (KASHIMORI Yoshiki)
電気通信大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号：70233707

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

藤田 一寿 (FUJITA Kazuhisa)
津山高等専門学校・総合理工学科・講師
研究者番号：80462141

(4) 研究協力者

()