

國府寛司

京都大学大学院理学研究科・教授

ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御

§1. 研究実施体制

(1)「相空間構造解析」グループ

① 研究代表者: 國府 寛司 (京都大学大学院理学研究科、教授)

② 研究項目

- ・ダイナミクス全構造計算法の整備と発展
- ・ネットワーク結合力学系の相空間構造の解析
- ・回帰的ダイナミクスに対する位相計算的解析法の開発
- ・相空間全構造計算による力学系の遷移的ダイナミクスの解明
- ・位相計算的分岐理論の基礎付け

(2)「ネットワーク結合力学系」グループ

① 主たる共同研究者: 青柳 富誌生 (京都大学大学院情報学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・身体リズム現象等を記述する結合力学系モデルの構築と解析
- ・相空間構造から見たアトラクタ間遷移と時空間パターンの関係性
- ・実験データから推定した結合系の相空間構造の解析
- ・結合力学系のマイクロな構造とマクロな挙動の関連づけ

(3)「身体力学」グループ

① 主たる共同研究者: 土屋 和雄 (同志社大学理工学部、教授)

② 研究項目

- ・歩行における位相反応曲線の同定とシステムモデルの構築
- ・全身リズム運動の運動生成・調整機構の解明
- ・脚歩行における歩容遷移・歩容の切り替え機構の解明
- ・リズム調整機構を持つ歩行ロボットの開発

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

本研究では

- (A)ダイナミクス位相計算理論に基づく相空間全構造計算法の整備と発展
- (B)ネットワーク結合力学系のモデル化と解析に基づく機能発現メカニズムの解明
- (C)身体リズム運動の数理モデルの構築とその制御機構の解明

という3つの研究課題を設定し、位相計算理論に基づく非線型力学系の相空間全構造解析の新しい数学的方法を整備・発展させること、またそれをネットワーク結合力学系や身体リズム運動の数理モデルなどの様々な非線型力学系に適用して相空間構造の解析を行うことで、ダイナミクスの相空間構造の観点からの数理解析と、それに基づく制御メカニズムの工学的実証の双方からのアプローチによって、ヒトや動物が動的に変動する環境に適応し様々な活動を行うための基礎となる脳神経・身体リズム機構の理解と制御を目指すことをねらいとする。

上記の研究課題に対応して、研究チームを相空間全構造解析グループ、ネットワーク結合力学系グループ、身体力学グループに分け、それぞれのグループが個々の研究課題に取り組むとともに、頻繁に CREST ミーティングを開いて討論を行い、グループ間で緊密に連絡を取りながら研究を実施している。今年度は、研究計画に

- 1) ダイナミクス全構造計算法の整備と実行
- 2) 様々な数理モデルのアトラクタ構造とその遷移
- 3) 脳神経・身体リズム運動特性の計測と解析

の3つのテーマを挙げ、それに沿って以下の内容を含む多くの成果を得た。

1) ダイナミクス全構造計算法の整備と実行

・ 22 年度からアメリカの研究グループと共同でダイナミクス全構造計算法のソフトウェアの改良を進めてきたが、23 年度にその試作版を完成させ、メモリ効率や計算速度などについて旧バージョンとの性能比較などの検討を開始した。現在、新バージョンに取り入れられた基礎的数学理論をまとめた論文を準備中である。

・ ODE の全構造計算のために Taylor モデルと呼ばれる精度保証付き数値計算法を採用し、それと全構造計算法との融合を進めると共に、Van der Pol 方程式や Lorenz 方程式などの具体例に適用して問題点の確認を行った。

・ JST 国際強化支援の補助を受け、関連する研究者を国内外から招聘して、24 年3月に Developers Workshop on Conley-Morse-Database Project という国際研究会を開催し、開発したソフトウェアや相空間構造解析の方法、今後の発展の可能性や方向を様々な視点から検討した。

・ 相空間構造解析の方法に基づく力学系の位相計算的分岐理論の研究では、22 年度から開始

したサドルノード分岐の位相計算的研究を完成させ(論文[2]),その発展として,crisis と呼ばれる大域的な分岐現象の位相計算的観点から捉えるための数学的理論付けを行った(論文準備中).

- ・今年度に得られた新しいアイデアとして,力学系から生成される時系列データを位相計算的方法で解析することで,元の力学系の相空間構造の情報を取り出せることがわかってきた(速報として[1]).これを試験的に身体力学グループの実験的研究で得られたデータなどに適用した結果,ネットワーク結合系グループや身体力学グループで扱われるシステムの解析に有力な方法となる可能性が見出されたので,今後の重要なテーマとして検討していく.

2) 様々な数理モデルのアトラクタ構造とその遷移

- ・22年度から引き続いていくつかの数理モデルに対して全構造計算法による相空間構造解析を行い,その有効性や限界を確認した.特にCMLと呼ばれる3次元結合カオス振動子系について,安定および不安定な不変円周とそのパラメータ変化を解析し,この方法の有効性を示した.また,GCM(大域結合写像系)の相空間構造解析では,巨大な回帰的不変集合の内部構造を見るために開発した短サイクルの方法による解析を行い,その特徴的な遍歴現象に対する位相計算的な説明を与えた.これらの成果については現在,論文を準備中である.

- ・結合振動子系において3体相互作用がアトラクタ構造にどのような影響を与えるかを理論的に解析し,初期状態に応じてある範囲の任意の蔵本オーダーパラメーターの値(系全体の同期の度合いを示す量)を実現することが可能なアトラクタの存在が示された(論文[8]).また,結合が変化する振動子ネットワークに関する解析も行った(論文[9]).

- ・結合力学系の作るマクロな集団リズムに関する研究として,22年度に自律的なリズムを持つミクロな振動子が多数結合した系に対する位相縮約理論を発展させたが,これをミクロな要素が振動的でない状況にも拡張し,マクロなリズムを生成する分岐と位相応答関数の形状の関係を論じた(論文[11]).

- ・ヒト歩行・走行遷移現象のメカニズムを明らかにするために,歩容が共に不安定となる自発的遷移速度近傍での定常歩行・走行時の筋電位計測とそのデータ解析を行うと共に,22年度までに相空間全構造解析グループと協力して構築した2足歩行のコンパス型低次元モデルを脚にバネを持つモデルに発展させ,ヒトの歩行・走行の運動計測とデータ解析と関連させて,歩行・走行の生成と遷移を説明する力学構造の解析を開始した.

- ・4脚動物の歩行速度に依存したウォーク,トロットなどの適応的な歩容生成と遷移のメカニズムを明らかにするために,22年度までに構築した数理モデルに基づく動力学シミュレーションとリターンマップに基づく安定解析を行い,身体力学,振動子ネットワークと環境との力学的相互作用から,歩行速度に応じた安定解と不安定解が存在し,一定の速度領域において異なる安定解が共存することを明らかにした.また,この安定解,不安定解から歩容遷移におけるヒステリシスを生成する力学構造を明らかにした(論文[15]).これらの結果に基づいて4脚ロボットを開発し,振動子ネットワークを用いた歩行制御系を搭載して実機実験を行って,上述のシミュレーションより明らかにした4脚動物の歩容遷移におけるヒステリシスを生成する力学構造を実証した(論文[18]).

3) 脳神経-身体リズム運動特性の計測と解析

- ・ 微小外乱を加えた歩行運動の運動学実験により外乱前後の運動における位相差の存在を明らかにし(論文[24]), 外乱後の運動の安定化過程を, 歩行を拘束する低次元空間内の等位相面に記述することにより, 接地・離地時の位相調整メカニズムを明らかにした(論文[19]). また, 関節運動の低次元構造である運動学シナジーが, 重心や足の動きに比べて歩行周期ごとの分散が小さいことを示し, 運動学シナジーが歩行の運動制御に本質的に関わっている可能性を示した(論文[20]).
- ・ 運動学シナジーを制御系に用いた歩行運動のシステムモデルを構築し, そのシミュレーションによって, 実験・解析において解決できなかった制御系の変化と環境からの反作用の関わる問題を明らかにし, システムモデルの有効性を示した.
- ・ 全身リズム運動の運動生成・調整機構の解明のために, 平坦な床面・柔らかい床面・ゆっくりと傾斜が変化する床面上の3種類の環境でヒトの直立姿勢維持中に発生する0.05Hzほどのゆっくりとした姿勢動揺の発現機構を調べる運動学実験を行い, 柔らかい床面上での大きな振幅を持つ姿勢動揺の発生, 傾斜が変化する環境下で時間遅れを伴った垂直姿勢への復帰が起こることを明らかにした. これらの実験結果をもとに, 間欠制御に積分補償項を加えた姿勢制御モデルを提案し, 姿勢動揺を説明できることを示した.
- ・ 実験データから直接縮約した位相振動子の結合力学系の同定に関し, 等位相面にポアンカレ断面を正確にとらない場合には無視できない誤差が生じることを示し, それを解決できるような位相応答曲線の推定の手法を与えた. また, それを Stuart-Landau 振動子に適用して, 誤差の原因を理論的に精査することに成功した. 更に関連するデータ処理手法の解析も行った(論文[9]).

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Zin Arai, Hiroshi Kokubu and Ippei Obayashi, "Capturing the global behavior of dynamical systems with Conley-Morse graphs", *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 2012, Springer. (in press)
2. Zin Arai, Marcio Gameiro, Tomas Gedeon, Hiroshi Kokubu, Konstantin Mischaikow, Hiroe Oka, "Graph-based topological approximation of saddle-node bifurcation in maps", to appear in *RIMS Kokyuroku Bessatsu*. (DOI:なし)
3. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Allan T. Gullledge, Atsushi Mochizuki, Andreas Schertel and Yasuo Kawaguchi, "Conserved properties of dendritic trees in four cortical interneuron subtypes", *Scientific Reports*, Vol.1, 89 (13 pages) (2011). (DOI:10.1038/srep00089)

4. Obayashi Ippei, “Computer-assisted verification method for invariant densities and rates of decay of correlations”, *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.* Vol. 10 (2011), pp. 788-816 (DOI:10.1137/09077864X)
5. Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, “A mathematical mechanism for instabilities in stripe formation on growing domains”, *Physica D* 241 (2011), pp. 37–59. (DOI:10.1016/j.physd.2011.09.016)
6. Masaaki Yadome, Kei-Ichi Ueda, Masaharu Nagayama, “Chaotic motion of propagating pulses in the Gray-Scott model”, *Physical Review E* 83 056207 (6 pages) 2011/5/9 (DOI: 10.1103/PhysRevE.83.056207)
7. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, “Self-organized network of phase oscillators coupled by activity-dependent interactions”, *Physical Review E*, vol.84, Issue 6, 066109 (14 pages) (2011). (DOI:10.1103/PhysRevE.84.066109)
8. Takuma Tanaka and Toshio Aoyagi, “Multi-stable attractors in a network of phase oscillators with three-body interactions”, *Physical Review Letters*, vol.106, Issue 22, 224101(4 pages) (2011). (DOI:10.1103/PhysRevLett.106.224101)
9. Kaiichiro Ota, Takaaki Aoki, Koji Kurata and Toshio Aoyagi, “Asymmetric neighborhood functions accelerate ordering process of self-organizing maps”, *Physical Review E*, vol.83, Issue 2, 021903(9 pages) (2011). (DOI:10.1103/PhysRevE.83.021903)
10. Ikuhiro Yamaguchi, Yutaro Ogawa, Yasuhiko Jimbo, Hiroya Nakao, and Kiyoshi Kotani, "Reduction Theories Elucidate the Origins of Complex Biological Rhythms Generated by Interacting Delay-Induced Oscillations", *PLoS ONE* 6, e26497 (1-10) (2011). (DOI:10.1371/journal.pone.0026497)
11. Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, and Yoshiki Kuramoto, "Collective phase description of globally coupled excitable elements", *Physical Review E* 84, 046211 (1-12) (2011). (DOI:10.1103/PhysRevE.84.046211)
12. Shigefumi Hata, Kensuke Arai, Roberto F. Galán, and Hiroya Nakao, "Optimal phase response curves for stochastic synchronization of limit-cycle oscillators by common Poisson noise", *Physical Review E* 84, 016229 (1-10) (2011). (DOI:10.1103/PhysRevE.84.016229)
13. Takaaki Aoki, Yuri Kamitani and Toshio Aoyagi, “Self-organizing network of coupled neural oscillators with synaptic plasticity”, *Proc. 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2011)*, pp.350-353 (2011). (DOI:なし)
14. N. Ogihara, S. Aoi, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, and M. Nakatsukasa, “Forward dynamic simulation of bipedal walking in the Japanese macaque: investigation of causal relationships among limb kinematics, speed, and energetics of bipedal

- locomotion in a non-human primate”, *American Journal of Physical Anthropology*, 145(4): 568-580, 2011 (DOI: 10.1002/ajpa.21537).
15. S. Aoi, T. Yamashita, and K. Tsuchiya, “Hysteresis in the gait transition of a quadruped investigated using simple body mechanical and oscillator network models”, *Physical Review E*, 83(6):061909, 2011 (DOI: 10.1103/PhysRevE.83.061909).
16. S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, and K. Tsuchiya, “Sensory regulation of stance-to-swing transition in generation of adaptive human walking: A simulation study”, *Robotics and Autonomous Systems*, 60(5): 685-691, 2012 (DOI: 10.1016/j.robot.2011.12.005).
17. S. Aoi, S. Fujiki, T. Yamashita, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Generation of adaptive splitbelt treadmill walking by a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2274-2279, 2011 (DOI: 10.1109/IROS.2011.6094583).
18. S. Aoi, S. Fujiki, D. Katayama, T. Yamashita, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Experimental verification of hysteresis in gait transition of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2280-2285, 2011 (DOI: 10.1109/IROS.2011.6094480).
19. T. Funato, T. Hosokawa, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Isochron of human walking derived from the perturbation of floor", *Proceedings of the 5th Internal Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines*, pp. 35-36, 2011 (DOI コードなし).
20. T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Human gait control suggested by the evaluation of the fluctuation of synergy", *Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 267-272, 2011 (DOI: 10.1109/SII.2011.6147458).
21. Sato, Y., Aoki, S., Yanagihara, D. “Gait modification during approach phase when stepping over an obstacle in rats”, *Neurosci. Res.*, 72: 263-269, 2012 (DOI: 10.1016/j.neures.2011.11.008).
22. S. Aoi, N. Hayashi, T. Kondo, D. Yanagihara, S. Aoki, H. Yamaura, N. Ogihara, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Hindlimb obstacle avoidance during rat locomotion based on a neuromusculoskeletal model", *Proceedings of the 4th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, (accepted).
23. S. Fujiki, S. Aoi, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Emergence of hysteresis in gait transition of a hexapod robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", *Proceedings of the 4th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical*

Robotics and Biomechatronics, (accepted).

24. T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Analysis of rhythm adjustment mechanism of human locomotion against horizontal perturbation", Proceedings of the 4th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, (accepted).