

國府 寛司

京都大学理学研究科
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
- ・ 位相計算法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との関係性
- ・ 実験データから推定した結合系の相空間構造の解析
- ・ 結合力学系のミ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: 青井 伸也 (京都大学大学院工学研究科、助教)

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. 研究実施の概要

この研究の目的は、様々な非線型現象に現れるダイナミクスの問題に対して、その力学系の相空間全体の構造を、Conley-Morse グラフの方法と呼ばれるトポロジーと精度保証付き数値計算の融合による新しい数的手法を用いて解析することで、現象のより良い理解や新しい応用の可能性を切り拓くことである。更に、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・神経系と身体系の協調的リズム機構を取り上げ、多様な歩行運動を記述する力学系や、それを制御する脳・神経ネットワーク力学系の相空間構造解析の観点からの解明を目指すものである。

我々は、歩行運動などの複雑多様なダイナミクスを相空間構造解析の観点から理解するための共同研究に取り組む中で、数理モデルだけに頼らず、実際の歩行運動の計測で得られる力学系の時系列データから相空間構造の情報を直接に取り出すような新しい時系列解析法が有用であることを見出した。また、リズム現象の研究においても、その本質的な情報を担う位相記述を実データから直接に求める方法も開発している。

平成 25 年度に、様々な歩行運動の特徴的構造を取り出すための骨格運動や筋活動の精密な計測やそれに基づく数理モデルの構築とシミュレーション、計測データからの直接的なリズムダイナミクス記述、シンプルな歩行モデルの数理解析により歩行運動の本質的構造を解明しようとする試み、さらに理論的基礎としてのネットワーク結合系の新しい数学的理論の展開など、多くの結果が得られた。以下に、その中の主要な結果について簡単に述べる。

ネットワーク結合 ODE 系の相空間構造解析の研究において開発された、リミットサイクル振動子の結合力学系としてのネットワーク構造を推定する数的手法を、ヒト歩行における肢間協調の制御機構を調べるために、離散的なインパルス刺激を与えた歩行運動の計測を行ったデータに適用した。その結果、2足の安定歩行の位相差に小さな擾乱を加えても殆ど制御はされておらず、ある程度大きなずれが生じた場合に制御がかかる相互作用関数の形をしているという、2足歩行運動の、擾乱に対する制御に関する興味深い結果が得られた。これは、肢間協調が全く制御されない領域が存在するという意味を意味し、ハンドルにある程度の“遊び”がある事で制御がしやすくなる例と同様の、柔らかな制御則として工学的に注目される結果である。

非線型現象に見られるリズム運動の理論的研究においては、位相縮約法と呼ばれる数的手法が主要な解析の手段となるが、それはリミットサイクル振動子への摂動が弱いという仮定に基づいており、この仮定を除いた場合に位相縮約法がどのように修正されるかを明らかにすることは理論的にも応用上も重要である。強い摂動を受けたリミットサイクル振動子に対する位相縮約法の一般化として、振動子への入力軌道への緩和時間に比べてゆっくり変動するという条件のもとで、入力の各値に対するリミットサイクル軌道の族からなる円筒上を振動子の状態が動くとして、この円筒上に定義した位相ダイナミクスを近似的に記述する拡張位相方程式を導出した。

2足歩行運動の最もシンプルなコンパス型の力学モデルを用いて、安定な2足歩行を生成する吸引領域の形成メカニズムを解析した。この力学モデルは、振子の運動に対応する連続力学系と、脚の接地衝突に対応する離散力学系を合成したハイブリッド力学系であり、歩行運動の特徴的な構造を反映した数理モデルになっている。その相空間構造の解析により、歩行運動の安定領域が

フラクタル様の複雑な構造を形成することを明らかにした。この構造は、歩行運動における脚の振り子運動のサドルの不安定性と、脚の接地衝突に対応する離散力学系との相互作用によるものであり、個々の数理モデルの詳細には依存しない2足歩行運動の本質的特徴を捉えたものであると考えられる興味深い結果である。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国内)

1. 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄, “運動学シナジーに基づくヒトの歩行制御構造の構成論的理解”, 日本ロボット学会誌, vol. 31, No. 8, pp. 739-746, 2013

論文詳細情報(国際)

1. Hiroshi Kokubu and Hiroe Oka, A topological computation approach to the interior crisis bifurcation, *Nonlinear Theory and its Applications IEICE*, Vol.4, No.1 (2013), 97-103. (DOI: 10.1587/nolta.4.97)
2. Masahiro Kazama, Wataru Kurebayashi, Takahiro Tsuchida, Yuta Minoshima, Mikio Hasegawa, Koji Kimura, and Hiroya Nakao, “Enhancement of noise correlation for noise-induced synchronization of limit-cycle oscillators by threshold filtering”, *NOLTA (IEICE)*, in press (2014).
3. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, “Advection of passive particles over flow networks”, *Physical Review E (American Physical Society)* 89, 020801(R) (2014) [4 pages] (DOI: 10.1103/PhysRevE.89.020801)
4. Yoji Kawamura and Hiroya Nakao, “Noise-induced synchronization of oscillatory convection and its optimization”, *Physical Review E (American Physical Society)* 89, 012912 (2014) [13 pages] (DOI: 10.1103/PhysRevE.89.012912)
5. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, “Dispersal-induced destabilization of metapopulations and oscillatory Turing patterns in ecological networks”, *Scientific Reports (Nature Publishing Group)* 4, 3585 (2014), DOI: 10.1038/srep03585 [9 pages] (DOI: 10.1038/srep03585)
6. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, “Sufficient conditions for wave instability in three-component reaction-diffusion systems”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 013A01 (2014) [17 pages] (DOI: 10.1093/ptep/ptt102)
7. Yoji Kawamura and Hiroya Nakao, “Collective phase description of oscillatory convection”, *Chaos (American Institute of Physics)*, *Chaos* 23, 043129 [11 pages]

- (2013) (DOI: 10.1063/1.4837775)
8. Wataru Kurebayashi, Sho Shirasaka, and Hiroya Nakao, "A phase reduction method for strongly perturbed limit cycle oscillators", *Physical Review Letters* (American Physical Society) 111, 214101 [5 pages] (2013) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.214101)
 9. Yu Atsumi, Shigefumi Hata, and Hiroya Nakao, "Phase ordering in coupled noisy bistable systems on scale-free networks", *Physical Review E* (American Physical Society) 88, 052806 [15 pages] (2013) (DOI: 10.1103/PhysRevE.88.052806)
 10. Soichiro Fujiki, Shinya Aoi, Tsuyoshi Yamashita, Tetsuro Funato, Nozomi Tomita, Kei Senda, and Kazuo Tsuchiya, "Adaptive splitbelt treadmill walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", *Autonomous Robots*, vol. 35, No. 1, pp. 15-26, 2013 (DOI: 10.1007/s10514-013-9331-6)
 11. Soichiro Fujiki, Shinya Aoi, Tetsuro Funato, Nozomi Tomita, Kei Senda, and Kazuo Tsuchiya, "Hysteresis in the metachronal-tripod gait transition of insects: A modeling study", *Physical Review E*, vol. 88, No. 1, pp. 012717-1-012717-7, 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevE.88.012717)
 12. Sho Aoki, Yamato Sato, and Dai Yanagihara, "Lesion in the lateral cerebellum specifically produces overshooting of the toe trajectory in leading forelimb during obstacle avoidance in the rat", *Journal of Neurophysiology*, vol. 110, No. 7, pp.1511-1524, 2013 (DOI: 10.1152/jn.01048)
 13. Hiroshi Yamaura, Hirokazu Hirai, and Dai Yanagihara, "Postural dysfunction in a transgenic mouse model of spinocerebellar ataxia type 3", *Neuroscience*, vol. 243, pp.126-135, 2013 (DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.03.044)
 14. Hiroko Kotajima, Kazuhisa Sakai, Tsutomu Hashikawa, and Dai Yanagihara, "Effects of inferior olive lesion on fear-conditioned bradycardia", *NeuroReport*, in press, 2014 (DOI: 10.1097/WNR.0000000000000135)
 15. Zin Arai, Hiroshi Kokubu, and Ippei Obayashi, Capturing the global behavior of dynamical systems with Conley-Morse graphs, "Advances in Cognitive Neurodynamics (III)" *Proceedings of The Third International Conference on Cognitive Neurodynamics*, (Niseko, Japan, June 10-13, 2011), Springer,2013, pp. 665-672
<http://www.springer.com/biomed/book/978-94-007-4791-3>
ISBN 978-94-007-4791-3
 16. Shinya Aoi, Tetsuro Funato, Nozomi Tomita, and Kazuo Tsuchiya, "Neuromusculoskeletal model of human running based on muscle synergy", *Proceedings of 5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions*, pp. 6-9, 2013 (DOI: なし)
 17. Tetsuro Funato, Koji Hashizume, Shinya Aoi, Nozomi Tomita, and Kazuo Tsuchiya,

“Experimental validation of nonlinear PID control model for human sway during standing”, Proceedings of 5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions, pp. 10-13, 2013 (DOI: なし)

18. Tetsuro Funato, Yuki Yamamoto, Shinya Aoi, Nozomi Tomita, Takashi Imai, Toshio Aoyagi, and Kazuo Tsuchiya, “Estimating the phase response curve of human walking using WSTA method”, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, pp. 1298-1299, 2013 (DOI: なし)