

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: 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

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的解析と、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、頻繁に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) ネットワーク結合力学系の相空間構造の解析
- 3) 脳神経-身体リズム運動特性の実験データに基づく全構造解析

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

- ・国外の研究協力者と共同で、ダイナミクス全構造計算のプログラムの改良版の開発を行った。改良版では、隣り合うパラメータ領域間の Conley-Morse 分解の隣接関係を表示する **clutching graph** の機能が盛り込まれると共に、その隣接関係を利用して Conley 指数の計算を大幅に削減することが可能になった。もう1つの重要な機能は、相空間のグリッド分割を一様に取らなくても良いようにしたことである。これにより、ダイナミクスの重要な部分については細かいグリッド分割を取って回帰的不変集合の微細な構造まで計算し、そうでない部分では粗い分割で計算コストを減らして計算を実行できるようになった。以上の改良版の機能の数学的な内容をまとめて論文として発表した[2]。
- ・ODE に対するダイナミクス全構造計算について、特に ODE の数値積分の方法として Lohner 法と Taylor Model 法の2つの可能性を比較検討するための精密な数値評価実験を行い、それぞれの方法の得失を検討した。それに基づいて、Lohner 法を実装したソフトウェア CAPD を利用して、ある4次元 ODE 系の全構造計算に着手した。また、Taylor Model 法を実装したソフトウェア COSY を用いて、5次 Van der Pol 方程式の結合系のポアンカレ写像の計算を行った。
- ・未知の力学系から得られる時系列データを用いて相空間構造解析を行うことは、本研究における有効な方法となると考え、2足歩行運動における歩行-走行遷移の計測データに対する Morse

graph 解析を行い、歩行-走行遷移に対応する遷移軌道の抽出を試みた。

- 位相振動子とコンパス型脚モデルを用いた複数種類の 2 足歩行のシンプルな数理モデルを身体力学グループが構築し、この力学系の相空間構造解析を行った。その結果、この力学系に内在する不安定周期解と足の接地条件を与える力学条件との関係や、安定多様体・不安定多様体の構造と、それに基づく歩行の安定周期解の吸引領域境界の構造が明らかになった。また、これらの数理モデルから数値積分によって取得した時系列データに対して相空間構造解析を行い、異なる数理モデル間の共通の構造が見出されることや、位相調整の有無による安定領域の違いなどを確認した。今後は、さらに精密な数理モデルや実際の歩行運動との比較を行っていく予定である。
- 位相計算的分岐理論の研究として、前年度から継続している **interior crisis** についての論文を完成し、発表した[3]。また、**Morse** 分解から判定できる新しい分岐現象として、**Morse** 分解のモドロミーについての理論的研究と具体例における検証を行った。

2) ネットワーク結合力学系の相空間構造の解析

- CPG に筋骨格系が結合した系などのマイクロな要素が振動子ではない場合も含む様々な系の位相応答関数の同定の基礎として、ゆっくり変動する強い外力を受けて形状が大きく変化するリミットサイクル振動子に対する位相縮約法や、ダイナミクスが区分的にスムーズで不連続点を持つようなハイブリッド系のリミットサイクル振動子に対する位相縮約法、などを発展させた。また、ネットワーク結合力学系における振動的不安定性や集団振動現象の解析を行った[6,8]。
- 歩行計測実験などのリズムを内在すると考えられる時系列データから、ダイレクトに縮約した結合力学系(位相振動子ネットワーク)を同定するベイズ統計に基づいた手法の開発に着手した。
- 結合の重みが増えるネットワーク結合力学系の基礎的研究を行った。一般に、神経系や社会ネットワークなどを考えても、各素子の状態に応じてネットワークのリンク構造が変化することは自然であるが、この事実を考慮した一般的な理論研究は殆どない。そこで、リンクを通じた相互作用の最も基本的なものとして拡散的相互作用を考え、各ノード上にはリソースの散逸力学系を仮定した。また、リンク構造のダイナミクスとして、リンクの重み(拡散係数)がその拡散量に応じて成長するモデルを考えた。これは例えば飛行機やインターネットの行き交う情報量や交通量に応じて通信容量や輸送量を整備する社会ネットワークとも関係の深いモデルである。その結果として、自己組織的にマクロには定常なスケールフリー構造が獲得されるが、マイクロには状態は変化し続ける(カオス的に振る舞う)ことを、数値計算と理論解析により確認した[4]。
- 時間遅れ系のリミットサイクル解に対応する位相縮約法を発展させた。特に、**Hale** の理論に基づいて、時間遅れ系の位相感受関数の従う随伴方程式を導いた[7]。また、時間遅れフィードバックにより安定化された2リンクのマニピュレータの数理モデルにおけるリミットサイクル振動状態を位相縮約法により解析した。
- そのほかに、神経ネットワークにおいて、疎表現(**sparse coding**)仮説を用いて一次視覚野における複雑型細胞の形成についての結果[5]や、環境ノイズを用いた非線形振動子の共通ノイズ同

期現象に関する研究も行った。

3) 脳神経-身体リズム運動特性の実験データに基づく全構造解析

- ヒトの歩行運動における微小外乱応答実験を行い、ネットワーク結合力学系グループの提案する(改良)WSTA法を用いて位相応答曲線を同定した。同定された位相応答曲線は従来提案されてきた解析手法に対して、被験者間・試行間のばらつきがほとんどない点で高い精度を有し、離地時・接地時に明確なピークを持つ特徴を示した [24]。
- ラット後肢の解剖学データに基づく筋骨格モデルと、筋活動に内在する低次元構造を表す筋シナジー、感覚情報に基づく運動指令の調整を行う位相リセットや肢間協調制御など生理学的知見に基づく神経制御モデルを統合して、ラットの後肢障害物回避歩行の数理モデルを構築した。シミュレーション結果をラットの歩行計測と比較して数理モデルの妥当性を検証し、適切な肢間協調の制御がより高い障害物の回避に寄与し、位相リセットが障害物回避後の歩行の安定化に寄与するなど、感覚情報に基づく運動指令の調整の機能的役割を明らかにした [14], [23]。
- 昨年度までに提案した積分制御と非線形制御からなる直立時の姿勢制御モデルを基に、ヒトの直立運動の同定を行った。その結果、ヒトの運動は線形制御の安定限界付近で制御されており、床の安定性(柔らかさ)に応じて安定性が低下し、非線形制御によって(ゆっくりとした姿勢動揺を伴いながら)安定性を保つというヒトの姿勢制御機序を示した。
- ヒトの歩行から走行、及び走行から歩行への随意的な歩容遷移実験を行い、計測した運動学データに対して、相空間構造解析グループと共同で特異値分解、及び CM グラフを用いて特徴を抽出した。その結果、歩容遷移は脚の離地から着地までの短い期間に生じ、その前後での骨格構造の大域的な変化は小さいことが明らかとなった。また遷移前後の筋電位パターンの計測・解析を行い、遷移瞬間のストライド周期でのみ観察される特徴的な双峰性の発火パターンを発見した。
- 4足動物のウォーク・トロット遷移を説明する力学構造を調べるために、4足ロボットを開発し、位相リセットを有する振動子ネットワークを用いた歩行制御系を構築して、実機実験を行った。その結果、ロボット機構系、振動子制御系、そして環境との相互作用から歩行速度に応じてウォーク・トロット遷移が起こり、速度変化の方向に応じてヒステリシスが生じることを明らかにした。更にイヌの歩行計測も実施し、同様のヒステリシスが生じることを確認した。また、昨年度までに構築した数理モデルから明らかにしているヒステリシスを生成する力学構造を本実機実験で実証した [13]。
- 4足歩行と2足歩行を実現可能な機構を持つ2足ロボットを開発し、関節運動に内在する低次元構造を表す運動学シナジーや位相リセットなど生理学的知見に基づいて歩行制御系を構築して、4足歩行から2足歩行への歩容遷移に関する実機実験を行った。その結果、運動学シナジーに基づく運動計画によって4足歩行と2足歩行という異なる歩容を連続的に遷移させることが可能になり、位相リセットに基づく運動調整によって安定でロバストな歩容遷移が実現できることを明らかにした [11]。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Zin Arai, Marcio Gameiro, Tomas Gedeon, Hiroshi Kokubu, Konstantin Mischaikow, Hiroe Oka, Graph-based topological approximation of saddle-node bifurcation in maps, RIMS Kokyuroku Bessatsu B 31 (2012), 225-241.
2. Justin Bush, Marcio Gameiro, Shaun Harker, Hiroshi Kokubu, Konstantin Mischaikow, Ipei Obayashi, and Pawel Pilarczyk, Combinatorial-topological framework for the analysis of global dynamics, Chaos 22, 047508 (2012) (DOI:10.1063/1.4767672)
3. 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)
4. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Scale-free structures emerging from co-evolution of a network and the distribution of a diffusive resource on it, Physical Review Letters, vol.109, 208702, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevLett.109.208702)
5. Takuma Tanaka, Toshio Aoyagi, Takeshi Kaneko, "Replicating receptive fields of simple and complex cells in primary visual cortex in a neuronal network model with temporal and population sparseness and reliability", Neural Computation, vol. 24, no.10, pp.2700–2725, 2012 (DOI: 10.1162/NECO_a_00341)
6. Yu Atsumi and Hiroya Nakao, "Persistent fluctuations in synchronization rate in globally coupled oscillators with periodic external forcing", Physical Review E, vol. 85, 056207 (12 pages), 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevE.85.056207)
7. Kiyoshi Kotani, Ikuhiro Yamaguchi, Yutaro Ogawa, Yasuhiko Jimbo, Hiroya Nakao, and G. B. Ermentrout, "Adjoint Method Provides Phase Response Functions for Delay-Induced Oscillations", Physical Review Letters, vol. 109, 044101 (5 pages), 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.044101)
8. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, "Global feedback control of Turing patterns in network-organized activator-inhibitor systems", Europhysics Letters, vol. 98, 64004 (6 pages), 2012 (DOI: 10.1209/0295-5075/98/64004)
9. 山口郁博, 小川雄太郎, 中尾裕也, 神保泰彦, 小谷潔, "時間遅れを持つ皮質-視床モデルの実 Ginzburg-Landau 方程式への縮約", 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌) IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.132, No.10, pp.1563-1574, 2012 (DOI: 10.1541/ieejieiss.132.1563)

10. 山口郁博, 小川雄太郎, 中尾裕也, 神保泰彦, 小谷潔, "時間遅れを持つ皮質-視床モデルの線形解析", 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌) IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.132, No.11, pp.1787-1797, 2012 (DOI: 10.1541/ieejieiss.132.1787)
11. S. Aoi, Y. Egi, R. Sugimoto, T. Yamashita, S. Fujiki, and K. Tsuchiya, "Functional roles of phase resetting in the gait transition of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion", IEEE Transactions on Robotics, 28(6):1244-1259, 2012. (DOI: 10.1109/TRO.2012.2205489)
12. S. Aoi, Y. Egi, and K. Tsuchiya, "Instability-based mechanism for body undulations in centipede locomotion", Physical Review E, 87(1):012717, 2013. (DOI:10.1103/PhysRevE.87.012717)
13. S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, N. Tomita, T. Funato, T. Yamashita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion", Journal of the Royal Society Interface, 10(81):20120908, 2013. (DOI:10.1098/rsif.2012.0908)
14. S. Aoi, T. Kondo, N. Hayashi, D. Yanagihara, S. Aoki, H. Yamaura, N. Ogihara, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Contributions of phase resetting and interlimb coordination to the adaptive control of hindlimb obstacle avoidance during locomotion in rats: a simulation study", Biological Cybernetics, 107(2):201-216, 2013. (DOI: 10.1007/s00422-013-0546-6)
15. S. Aoki, Y. Sato, and D. Yanagihara, "Characteristics of leading forelimb movements for obstacle avoidance during locomotion in rats", Neuroscience Research, 74:129-137, 2012. (DOI:10.1016/j.neures.2012.07.007)
16. E. Takeuchi, Y. Sato, E. Miura, H. Yamaura, M. Yuzaki, and D. Yanagihara, "Characteristics of gait ataxia in $\delta 2$ glutamate receptor mutant mice, ho15J", PLoS ONE, 7(10):e47553, 2012 (DOI:10.1371/journal.pone.0047553)
17. Hiroshi Kokubu and Konstantin Mischaikow, A combinatorial framework for analysis of global dynamics and bifurcations, IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical, Procedia IUTAM 5 (2012), 195-198.
18. 森田英俊, 大自由度保存力学系における集団的振動, 数理解析研究所講究録 1827, 42-51 (2013)
19. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, "Co-evolving Network Dynamics between Reaction-Diffusive Resources on Nodes and Weighted Connections", Proceedings of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp. 574-577, 2012 (DOI: 不明)
20. Wataru Kurebayashi, Kantaro Fujiwara, Hiroya Nakao, and Tohru Ikeguchi, "A

- Theory on Noise-Induced Synchronization of Chaotic Oscillators", Proceedings of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Palma, Majorca, Spain, pp. 344-347, 2012 (DOI: 不明).
21. Ikuhiro Yamaguchi, Yutaro Ogawa, Hiroya Nakao, Yasuhiko Jimbo, and Kiyoshi Kotani, "Ginzburg-Landau Equations Reduced from Coupled Delay Differential Equations", Proceedings of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Palma, Majorca, Spain, pp. 915-918, 2012 (DOI: 不明).
 22. Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita, and Yoji Kawamura, "Phase description of stable limit-cycle solutions in reaction-diffusion systems", *Procedia IUTAM*, vol. 5, pp. 227-233, 2012.
 23. 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, pp. 1046-1051, 2012. (DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290884)
 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, pp. 1359-1364, 2012. (DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290935)
 25. 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, pp. 1638-1643, 2012. (DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290733)
 26. T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "A system model that focuses on kinematic synergy for understanding human control structure", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 378-383, 2012. (DOI: TBD)
 27. S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Cusp catastrophe embedded in gait transition of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 384-389, 2012. (DOI: TBD)
 28. S. Fujiki, S. Aoi, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Improving adaptive walking of a biped robot on a splitbelt treadmill by controlling the interlimb coordination", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.

396-401, 2012. (DOI: TBD)

29. T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "The contribution of kinematic synergy on feedback control of human walking", Proceedings of the 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, pp. 35-36, 2013. (DOI なし)