

「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」
平成21年度採択研究代表者

平成 21 年度
実績報告

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. 研究実施の概要

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、結合力学系や身体運動の数理モデルなどへのダイナミクス全構造計算法の適用を視野に入れて、プログラムの改良や大型計算機への実装など、今後の研究の技術的な準備を行うとともに、大域結合写像系、ホップフィールド型の連想記憶モデル、2足歩行の3質点コンパスモデルなど、いくつかの数理モデルについて、相空間構造解析のための検討を開始した。

また、位相振動子ネットワークの推定のための効率的な位相応答の計測方法等の開発、ヒトの歩

行運動における位相反応曲線を測定するための装置の開発、ヒトの適応的な歩行運動の生成における位相リセットを介した接地感覚情報に基づく運動指令の調整の重要性の確認、不安定な環境での2足安定歩行の数値シミュレーションでの再現、振動子ネットワークを用いた4脚步行運動の動力学シミュレーションでのウォーク、トロット、ペースなどの様々な歩容の自律的变化と、歩容遷移におけるヒステリシス現象の確認、などの結果が得られており、脳神経-身体リズム機構の理解と制御を目指すための数理モデルの構築や数理解析のポイント、相空間構造解析の手がかりが徐々に明らかになってきている。次年度以降は、これらの結果を基にして、相空間構造解析を本格的に進めて行く予定である。

§ 2. 研究実施体制

(1)「相空間全構造解析」グループ(京都大学)

①研究分担グループ長: 國府 寛司(京都大学、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

(2)「ネットワーク結合力学系」グループ(京都大学)

①研究分担グループ長: 青柳 富誌生(京都大学情報学研究科、講師)

②研究項目

- シンプルな結合力学系に対する全空間構造解析の試験的な適用
- 位相反応曲線の効率的な揺らぎ応答に基づく実験的計測手法の開発

(2)「身体力学」グループ(同志社大学)

①研究分担グループ長: 土屋 和雄(同志社大学、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
- 脚步行における歩容遷移・歩容の切り替え機構の解明

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

第1年度は、それぞれの研究グループにおける研究の立ち上げと、グループ間の共同研究体制の確立に主眼を置いて、以下のような研究を進めた。

1) ダイナミクスの相空間全構造計算法の実装

相空間全構造解析グループが中心となり、ダイナミクスの位相計算理論に基づく相空間全構造計算法のプログラムを大型計算機に実装し、試験的な計算を行ってその有効性を確認するとともに、計算を実行する上で計算速度やメモリ不足など幾つかの課題を発見した。今後、アルゴリズムの改良や計算方法の工夫を行って改善を図り、その有効性を高める。また連続時間の力学系に対する計算に着手し、問題点の確認と解決方法についての検討を開始した。

2) いくつかの最も単純な数理モデルに対する相空間全構造計算法の適用とその有用性の確認

相空間全構造解析グループとネットワーク結合力学系グループとは共同で、比較的単純なカオス的遍歴モデルでのアトラクタ遷移ダイナミクスや、振動的な特徴を持つ写像系などを対象に試験的に本研究の遂行に有効な力学系の候補を検証した。具体的には、小規模なホップフィールドタイプの連想記憶モデルや振動子ニューラルネットワークに対して、相空間構造の準備的な解析を行い、計算時間や素子数に対する結果の有用性について検討を行った。今後は、ダイナミクス全構造計算プログラムの整備を受けて、相空間全構造解析と従来の数值的・数理解析の方法を比較対照させて、より本格的な解析を行い、相空間全構造計算法の有用性と、改良すべき点の確認を行っていく。また、ネットワーク結合力学系グループでは、複雑ネットワーク上の結合力学系の示す集団ダイナミクスの解析や、センサーネットワークのパケット送信タイミングの制御に関する結合振動子モデルの数理解析等も行った。

3) ネットワーク結合力学系の素子となるダイナミクスの特性の推定方法の整備

ネットワーク結合力学系グループは、位相振動子ネットワークの推定に関連して、効率的な位相応答の計測方法等の開発と、マクロな位相とミクロな位相の理論的関係の考察を進めるための検討を行った。

図1のように、外部から揺らぐ刺激を与え、その応答から位相応答曲線を計測する手法を、理論的結果に基づき開発した。その他、周期性の強いカオス系や、振動的な集団ダイナミクスを示す結合力学系の位相応答に関する研究なども発展させた。これらを歩行力学系の解析に適用することも可能と思われるので、身体力学グループとモデルに対する検討の会合を定期的で開催し、準備を進めた。また、結合力学系を推定するための基礎理論や推定手法の理論的検討も行った。

身体力学グループは、ヒトの歩行運動における位相反応曲線を測定するための装置を開発した(図2)。この装置は、歩行運動中に外乱を与えられるようにするためのものであり、摩擦の小さいロ

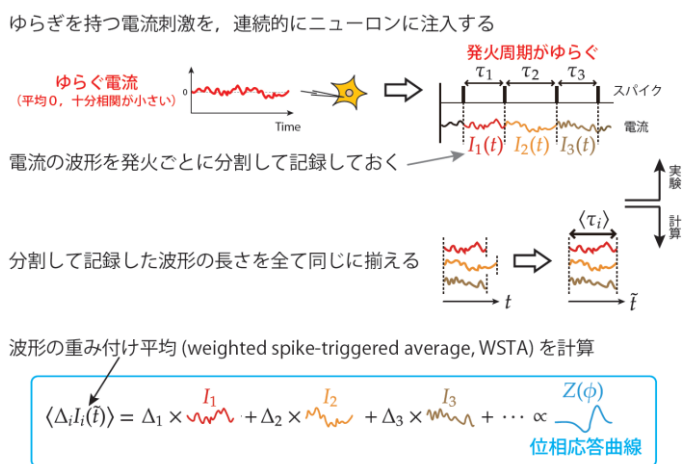


図1：位相応答曲線を計測する新しい手法の概要

ーラコンベア上にトレッドミルを置き、モータを用いてトレッドミルの並進位置を制御できるようにしている。次年度以降、この装置の基本的な動特性を調べ、ヒトの歩行実験を始めていく予定である。



図2. 位相反応曲線測定装置

4) ネットワーク結合力学系としての歩行運動の数理モデルの検討

歩行運動の、脳神経系に対応する CPG モデルと筋骨格モデルの数理モデルについて、身体力学グループと相空間全構造解析グループを中心に、

今後の研究対象となる数理モデル、特に2足3質点コンパスモデルや上田の研究で用いられたモデルの相空間構造について検討を行い、相空間構造解析の準備を行った。

身体力学グループでは、ヒトの適応的な歩行運動の生成における神経系の役割を調べるために、脊髄系の Central Pattern Generator に焦点を当てた神経系の数理モデルを構築し、ヒトの筋骨格モデルを組み合わせた動力学シミュレーションを行った。その結果、位相リセットを介した接地感覚情報に基づく運動指令の調整が、適応的な歩行生成に大きく寄与することが示唆された([1])。今後、相空間全構造解析グループと協力して研究を進めるために、数理モデルの構築を開始した。

また、相空間全構造解析グループの上田は、2足歩行システムの環境適応性に関して、不安定な杭上の2足歩行システムを研究し、杭に着地する足の位置と着地時の膝関節角度の間に適切な拘束条件を与えて、杭上の安定歩行の数値シミュレーションでの再現に成功した。杭上の歩行システムの解構造についても考察し、着地時の姿勢を歩行速度の関数として記述することで歩行の安定性が向上することを明らかにした。

5) 脳神経-身体リズム運動における様々な機能・現象と相空間構造との関係の検討

身体力学グループでは、腰関節で結合された2つの胴体と4本の脚から構成される4脚歩行の数理モデルをベースに、4つの脚の運動を生成する振動子ネットワークを用いて4脚歩行運動の動力学シミュレーションを行った。その結果、機構力学系と振動子力学系、そして環境との相互作用を通して、ウォーク、トロット、ペースなど様々な歩容が実現されることが明らかとされ、腰の関節剛性や歩行速度の変化に従って、自律的に歩容が変化することが明らかとなった。更にその歩行遷移において、ヒステリシスが起ることが安定性解析から示された。このような結果を相空間構造の観点から理解することが今後の課題である。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, and K. Tsuchiya, “Evaluating functional roles of phase resetting in generation of adaptive human bipedal walking with a physiologically based model of the spinal pattern generator”, *Biological Cybernetics* (in press) DOI: 10.1007/s00422-010-0373-y