

京都大学	博士 (情報学)	氏名	荒井 貴光
論文題目	Study on method for estimating phase coupling functions from time-series data and its application to human gait motion data (時系列データからの位相結合関数の推定手法とその歩行運動データへの応用に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、ネットワーク状に結合した力学系に対して、位相縮約理論に基づくデータ駆動型アプローチによる力学系推定手法に関して研究を行っている。本論文の前半ではネットワークの集団振動のリズム変化を記述する位相結合関数が正しく推定されるための観測変数の条件を検討し、後半では本手法の現実の問題への応用として人の歩行動作の実データ解析を行っている。</p> <p>第1章では、まず同期現象の発見から理論的研究、そしてデータ駆動型アプローチへの発展までの概説をしている。更に、位相縮約理論の適用範囲は集団振動を示すネットワーク力学系へと拡張されている一方で、この拡張はデータ駆動型アプローチの観点では議論がなされていない点を問題点として挙げている。</p> <p>第2章では、集団振動を示すネットワーク力学系の位相縮約に基づいたデータ駆動型アプローチに関する研究の成果をまとめている。特に、各ネットワークのダイナミクスを観測する際の観測変数の選定の問題に関し、各ネットワークの集団振動が完全同期、あるいは部分同期の場合にどの観測変数を選べば、集団振動間の位相結合関数の推定に成功するかをFitzHugh-Nagumoモデルを用いて検証している。その結果、集団振動が完全同期の場合はネットワーク内の特定の1素子を観測しても、あるいはネットワークの平均場を観測した場合でも、結合関数の推定結果に一致がみられ、したがって観測変数の選択によらず結合関数を正しく推定できると結論している。一方、部分同期の場合には、片方のネットワークから非同期の1振動子を観測した時に双方向の結合関数の推定精度に非対称性が見られることを報告している。以上の結果より本章での結論を次のようにまとめている。すなわち、完全同期の場合には、ネットワーク内の個々の素子が摂動に対して異なる応答を見せるにも関わらず、観測変数を柔軟に選ぶことができる。その一方で、部分同期の場合には、非同期の振動子を観測してしまうことが予期しない推定結果につながる可能性がある。</p> <p>第3章の内容は、トレッドミル上で歩行する健常者の歩行メカニズムの解析に関する研究の成果をまとめている。これは第2章における議論の実データ解析に対する応用という位置付けとなっている。具体的には、断続的に速度変化するトレッドミル上での歩行動作のデータを取得し、これを定量的に解析することで左右の脚の逆相同期を安定化させる制御機構を明らかにしている。従来、複雑な骨格筋の構成のために左脚と右脚のダイナミクスを解析することは困難と考えられていた。本論文では左脚右脚のダイナミクスを2個の結合位相振動子としてモデリングすることを提案し、これによりトレッドミルの速度変化によって乱された左脚右脚間の位相差を再び安定状態に収束させる制御機構を定量的に解析することに成功している。さらに、推定により得られた結合位相振動子系の位相結合関数を用いて歩行動作の制御を説明する関数を求め、この関数が左右の脚の位相差を逆相同期近傍のある位相差領域に収束させる作用を示す一方で、その領域内であれば位相差に積極的な制御が働かないという当初の</p>			

予想を覆す新たな知見を得ることに成功している。今回の推定で明らかとなったこの関数の意外な振舞いは、車のハンドルの遊びに類似しており、人間の歩行動作において省エネルギーが実現されるような方策を示唆しているのではないかとこの予想も述べている。

第4章では、本論文で扱った研究に関して概観を述べ、実データ解析における観測変数の選択について考えられる問題点を気象データ解析や脳機能データ解析の具体例を挙げて述べている。次に、実データ解析において同期している結合振動子系の結合関数を解析するためには同期を解消するための外部摂動が必要であるが、このような状況下での位相振動子モデリングの有効性を第3章の内容を挙げて述べている。本章の最後には、位相縮約理論に基づくデータ駆動型アプローチにおける問題点を述べており、等位相面が未知といった条件の下で、近似的な位相時系列を採用することの問題点と今後の課題にも言及している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文はネットワーク状に結合した力学系を複数想定して、各ネットワークの集団振動の巨視的な位相で見た集団振動間の位相結合関数を推定する手法とその応用に関する研究から構成されている。

先行研究において集団振動間の位相ダイナミクスを得るための位相縮約理論の拡張が既に行われているが、データ駆動型アプローチを用いることで集団振動の位相ダイナミクスを推定することが可能であると期待できる。その際、どのような観測の条件下であれば集団位相間の位相結合関数を正しく推定できるかは重要な問題であるが、これを検証した研究は国際的に見ても行われていない。特に、集団振動のような巨視的なダイナミクスを説明する位相結合関数を推定する際に、単一の素子のような微視的なダイナミクスを観測する場合は、望む推定結果が得られないかもしれないという危惧がある。本論文では、そのような課題を解決するため、系統的に力学系を構築し推定を行う形で実証的な検証を行っている。その結果、集団振動が完全同期の場合には柔軟な観測変数の選び方が可能であることを示した。その一方で、非同期的な振動子を観測している場合は、結合関数の推定精度に相互作用の方向に依存して顕著な差が見られることを示した。脳神経系などの現実のデータでは、部分同期を示すケースが多いと考えられ、観測変数の選択の影響を系統的に精査した点は評価に値する。

また、実データ解析に対する実際の応用として、トレッドミル上で歩行する健常者の歩行メカニズムの解析を行っている。歩行動作では、左右脚の半位相ずれた同期は非常に安定していることが知られており、安定領域から外れた十分なデータを取得するのに困難が伴うことが以前から認識されていた。これを解決するため、トレッドミルの速度に非周期的な外部摂動を与えることで同期状態を乱し、再び同期状態に収束するまでの時系列を取得することで、十分なデータを取得し解析に成功している。この方法では、外部摂動の効果も位相感受性関数として推定することが可能になり、その結果、左右の足の協調機構を表現する相互作用の測定精度を向上できることを実証している。このような解析は、世界的に見ても初めての例であり、更に歩行の解析に限定されない様々な同期現象に応用できる汎用性の高い優れた方法と考えられる。また、歩行の制御は本来筋骨格系と神経系の複雑なシステムで行われているが、それを位相振動子の観点から相互作用の関数形を通じてシンプルに解析した点は、位相縮約という理論の実験に対する有用性を示した点でも評価できる。更に、そこで見出された、位相差がある範囲内にあるうちは積極的に制御しないという歩行制御のメカニズムは、当初の予想を覆す興味深い発見であり、今後例えば歩行障害などの医療への応用へ向けた新たなデータ解析手法への展開が期待される。

上記の研究内容は、リズムを示す力学系理論の実データ解析に関する系統的な知見と、実際の応用の有用性を示した研究成果であり、非線形物理学と情報学の学際的領域研究として評価できる。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年2月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当面の間当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 年 月 日以降