

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	真尾 朋行
論文題目	Chaos Analysis of Heart Rate Variability and Experimental Verification of Hypotheses Based on the Neurovisceral Integration Model (心拍変動のカオス解析と神経内臓統合モデルに基づく仮説の実験的検証)		
(論文内容の要旨)			
<p>ストレスや疲労、眠気などの状態を推定することは、重要な社会課題となっている。一方、これらの生理的状态は計測や定量化が困難であることが知られており、これらの状態が引き起こす重大な事故を未然に防ぐために、如何に非侵襲的にストレスや疲労、眠気といった状態をリアルタイムに推定できるかが実用上の課題となっていた。</p> <p>本論文では、心拍変動に着目し、ウェアラブルセンサにより非侵襲的かつ継続的に収集可能な心拍変動データの解析を行う。心拍変動は健常な心拍において心拍間隔にゆらぎが生じる現象であり、心拍変動分析は自律神経活動の評価に用いられる。従来の線形分析とは異なる視点からの分析として、カオス解析など非線形分析が注目されているが、心拍変動のカオス性を評価する標準的な指標が確立されておらず、また心拍変動にカオス性が現れるメカニズムも明確になっていない。</p> <p>そこで本論文では、得られた観測データのみから計算可能で、数学的背景が明確なカオスの定量化指標として修正カオス尺度を提案する。さらに、心拍変動のカオスが脳の認知活動の影響によるものであるという仮説を導き出し、その仮説を検証するための実験を行い、提案した修正カオス尺度を実験データの解析に適用する。</p> <p>本論文は全6章で構成されている。</p> <p>第1章では、心拍変動という現象、および心拍変動のカオス性とカオス分析への期待について概観する。</p> <p>第2章では、非対称テント写像を用いてカオス尺度の性質を調べ、カオス尺度とリアプノフ指数の差が分割の影響によるものであることを明らかにするとともに、その差の大きさについて情報理論的な解釈を与える。</p> <p>また、非対称テント写像を用いて、カオス尺度の分割数無限大の極限を解析的に導出し、その結果、非対称テント写像のカオス度の極限值は、非対称テント写像の傾きが有理数か無理数かによって大きく異なることを報告している。</p> <p>第3章では、カオス尺度とリアプノフ指数の差に相当する情報量を取り除いたカオス尺度を修正カオス尺度と定義し、修正カオス尺度は離散化されたリアプノフ指数と一致することを証明する。さらに、修正カオス尺度はRosensteinの方法やサンプルエントロピーと比較して計算量が十分に少ない点において優位性があることを確認している。</p>			

第4章では、高次脳機能に関わる脳領域と心拍制御の関係を説明する神経内臓統合モデルや、大規模脳ネットワークに関する先行研究を整理するとともに、脳ネットワークの相互作用を三体問題に結びつける独自の考察を加え、心拍変動に現れるカオスを脳ネットワークの活動によって説明する仮説を立てる。

第5章では、仮説を検証するために、認知活動（暗算および数独）中の心拍間隔データを解析する実験を行い、認知活動中は修正カオス尺度をはじめカオス指標の値が顕著に増加する結果が得られたことを報告する。本結果は、既存の線形分析による自律神経活動指標には見られない特徴であり、第4章で述べた仮説を支持するものである。さらに、認知活動時のカオス指標の変化は身体負荷時とは逆方向であったことから、カオス指数比を定義し、カオス指数比が状態判別に利用できる可能性を示唆している。

第6章では、本論文のまとめを述べるとともに、本研究で提案した修正カオス尺度が心拍変動のカオス解析の標準的な指標となること、ならびに本研究の影響が医療分野に波及し、未解決問題の解決に向けて新たな道を切り拓くことへの期待と展望を述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、心拍変動のカオス性を精密に評価するため、新たなカオス性能指標である修正カオス尺度を提案し、その有効性を示した。更に、心拍変動に現れるカオスは高次脳活動に起因するという仮説を立て、修正カオス尺度により心拍変動のカオス性と高次脳活動との関連を調べた。本研究で得られた主な研究成果は以下の通りである。

1. 非対称テント写像において、厳密にカオス尺度を計算し、カオス尺度とリアプノフ指数の差の大きさに関して情報論的解釈を与え、リアプノフ指数との対応関係が明確な修正カオス尺度を提案した。
2. 修正カオス尺度が、既存のRosensteinの方法やサンプルエントロピーの方法と比較し、計算量が少なく、ウェアラブルセンサーなどによる心拍変動のカオス性のリアルタイム計測に適した手法であることを明らかにした。
3. 非対称テント写像を用いて、カオス尺度の分割数無限大の極限值を厳密に求め、非対称テント写像の傾きが有理数か無理数かで大きく異なるという非自明な結果を導出した。
4. 脳のネットワーク相互作用に着目し、心拍変動に現れるカオスを脳のネットワーク活動により説明する仮説を立てた。
5. 4.の仮説を検証するために認知活動（暗算および数独）中の心拍間隔データを解析する実験を行い、認知活動中は修正カオス尺度をはじめカオス指標の値が顕著に増加するという結果を得た。

以上、本論文は、新たなカオス性能指標である修正カオス尺度を提案し、リアプノフ指数との比較において精密かつリアルタイムなカオス性評価に適すことを示した。また、脳の認知活動と心拍変動のカオス性との関連するという神経内臓統合モデル仮説を検証する心拍変動の実データを用いた実験において、認知活動中の心拍変動の修正カオス尺度をはじめ様々なカオス指標の値が顕著に増加することを発見した。

これらの結果は、本研究で提案した修正カオス尺度が心拍変動のカオス解析の標準的な指標となり得ることを示すものである。この心拍変動のカオス解析により、ストレス、疲労や眠気といった心拍変動の特徴が明らかでなかった生理的状態のリアルタイム推定の道筋を与え、ドライバーの居眠り運転の防止といった社会的課題の解決につながる可能性を与える結果であると評価できる。

以上により、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20日に実施した論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： 令和5年4月1日以降