

氏名	道法 浩孝
学位の種類	博士（応用情報科学）
学位記番号	論博情第9号
学位授与年月日	令和4年 9月28日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当（論文博士）
論文題目	軌道領域減少法によるカオスシステムの制御 に関する研究
論文審査委員	（主査）教授 中本幸一 （副査）教授 水野由子 （副査）教授 原口亮

## 学位論文の要旨

カオス現象は力学系を始めてとして、気象の変化、生物の神経系など広く社会で見られる。この現象を引き起こすカオスシステムの制御には、に対する外部信号調節によるカオス制御法については、基本的な制御法としてOtt-Grebogi-Yorke法（OGY法）及び遅延フィードバック法等が知られている。これらのカオス制御法は何れも、カオス性を有するシステムの挙動（軌道）が挙動可能領域（アトラクタ）内の不安定周期点の近傍に近づいた時に、外部からの摂動を作用させてシステムの状態を平衡状態に安定化させたり、安定な周期状態に移行させる手法であり、安定解を確保しカオス状態を除去するアプローチに基づいている。

これに対して、互いに分離したアトラクタ領域間をカオス的に往来するカオス-カオス間欠性（Chaos-Chaos Intermittency: CCI）を呈するカオスシステムでは、カオス状態を排除するのではなく、システムの状態をカオス共鳴（システムにおける決定論的なカオス性がゆらぎ源としての役割を担う共鳴現象）の誘起に適切な別のカオス状態に移行させる新たな制御法の考案が期待される。すなわち、システムのカオス状態を維持することによりカオス共鳴を生かした制御が可能になると考えられる。

そこで本研究では、CCIを制御する手法として、システムへのフィードバック信号を通してカオス状態をカオス共鳴が誘起されやすい状態に移行させる軌道領域減少（Reduced Region of Orbit: RRO）法を共同研究者の1人として提案した。この手法は、システムのカオスダイナミクスから写像構造を推定し、アトラクタ併合の生起の原因となる写像関数の極大値と極小値をフィードバック信号により低減させることでCCIを制御する。その結果、内部パラメータを随時チューニングすることなくシステムにカオス共鳴を誘起するものである。本論文ではまず、このRRO法を離散時間カオスシステムに具体的に適用し、カ

オス共鳴の誘起を通して CCI の制御が機能することを確認した。次に、離散時間神経システム及び連続時間カオスシステムに適用を拡張し、RRO 法の汎用性を検証した。さらに、RRO 法を用いたカオス制御を精神疾患の 1 つである双極性障害の神経メカニズムモデルに適用し、双極性障害における病態との関連が指摘されている概日リズムの乱れの要因となる前頭野神経活動の CCI に対して、微弱な外部周期信号への同期による安定化を図り、RRO フィードバック信号による効果を検証した。以下に各章の概要を示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。第 2 章では、本研究において対象とするカオスシステム、従来のカオス制御、及び双極性障害の基本概念について概説し、それらを前提とする本研究の目的を提示し、研究の位置づけについて述べた。

第 3 章では、フィードバック信号を用いて CCI を制御する RRO 法を考案し、まず、それを離散時間カオスシステムである 1 次元 cubic 写像に適用した。その結果、2 つのアトラクタ領域の併合点付近において、適切なフィードバック信号強度に対し、外部入力信号に対する信号応答性がピークに達し、RRO 法を適用したカオス共鳴による信号応答性の制御が可能であることが確認された。次に、cubic 写像結合系においても、カオス共鳴による外部入力信号への CCI 同期の誘起が確認できた。また、この時いずれか一方の同一アトラクタ領域に閉じ込められた複数の cubic 写像要素は、互いに同期せず別軌道でカオス性を保持していることが確認された。これらの特徴は、結合数が数十程度の cubic 写像結合系においても維持されていた。さらに、RRO 法を離散時間神経システムの Sinha モデルに適用し、神経モデルにおけるカオス共鳴による CCI 同期について解析した。その結果、外部入力信号へのカオス共鳴が誘起されるとともに、共鳴周波数を有していることが確認できた。また、負の RRO フィードバック信号を入力することで、分離したアトラクタ領域の併合制御が可能であり、アトラクタ併合点付近のフィードバック信号強度においてカオス共鳴による CCI 同期が誘起されることが確認された。

第 4 章では、連続時間系でのポアンカレ (Poincaré) 断面上への写像関数を用いることによって、RRO 法を CCI を呈する連続時間カオスシステムである Chua 回路に適用した。その結果、適度な強度の正及び負の RRO フィードバック信号により、それぞれに対応したアトラクタ領域の分離・併合制御が可能であり、カオス共鳴が誘起され、離散時間カオスシステムと同様に、連続時間カオスシステムでも RRO 法が有効に機能することが確認された。

第 5 章では、RRO 法によるカオス制御のメカニズムを Hadaeghi らのニューラルモデルに適用し、双極性障害における概日リズムの乱れの安定化に対する効果を検証した。その結果、適切な強度の RRO フィードバック信号に対しカオス共鳴が誘起され、CCI を呈する前頭野の神経活動を健康な状態に相当する周期的挙動に誘導できることを確認した。さらに、

Hadaeghi らのモデルにおける抑制性のシナプス結合強度の広いパラメータ領域において、前頭野の神経活動と微弱な外部周期信号との間にカオス共鳴が生起することから、CCI の周期化、すなわち双極性障害における概日リズムの乱れの解消の広汎性が示唆された。

最後に第 6 章で、本研究のまとめと今後の課題について述べた。本研究での RRO 制御法は、非線形システムからカオスを排除する従来の硬い制御に対し、カオスを温存したまま周期に近いモードに誘導できる柔軟な制御となっており、複雑化が進む情報通信システムや社会システムなど広い対象の制御への展開が期待される。

### 論文審査の結果の要旨

最終試験は、先に実施された学位論文公聴会(令和 4 年 8 月 9 日 13 時から 14 時)での質疑応答を踏まえて、同日 14 時から 15 時まで口頭試問の形で行った。取り上げられた内容は、論文に記載された、カオスシステム制御の軌道領域減少法、その新規性やその双極性障害の神経モデルへの適用など・評価に関する質疑を中心として、カオスシステムのもととなったゆらぎと社会現象、当該手法の社会への応用など多岐にわたるものであった。

これらの事項についての質疑応答を通して、学位論文に関連する専門分野に関して、申請者は「博士(応用情報科学)」にふさわしい見識と研究能力をもつと認め、審査委員会において全員一致で合格と判定した。