

機関番号：24403

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560425

研究課題名 (和文) 興奮性媒体に生じる時空カオスのフィードバック制御

研究課題名 (英文) Studies on feedback control of spatio-temporal chaos
in excitable media

研究代表者

小西 啓治 (KONISHI KEIJI)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：90259911

研究成果の概要 (和文)：

興奮性媒体で代表される時空システムに生じる様々な非線形現象(スパイラル波, 時空カオスなど)を抑制する制御手法の提案・検証を行った. 制御対象の時空システムには, セルラーオートマトン興奮性媒体モデル, 不規則なトポロジーを有する結合写像系, 線維化を考慮した興奮性媒体モデル, 区分線形 FitzHugh-Nagumo モデルを採用した. また, システム制御理論の視点で検討を重ね, 提案手法の優位性を示めた.

研究成果の概要 (英文)：

This study proposes a few control methods for suppressing nonlinear phenomena, such as spiral waves and spatiotemporal chaos, in spatiotemporal systems. The following systems are employed as controlled objects: a cellular automata model of excitable media, coupled map lattices on irregular network topologies, excitable media with nonexcitable cells, and a piecewise linear FitzHugh-Nagumo model. The superiority of our methods is provided from a viewpoint of control theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：非線形科学・システム制御理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：複雑系, 興奮性媒体, 時空カオス, 非線形現象, 遅延フィードバック

1. 研究開始当初の背景

(1) 心室細動除去とその問題点

突然死の6割以上が心臓疾患によるものである. この突然死では, 多くの場合, 心室に痙攣(心室細動)が生じ, 全身に血液が送り出せ

なくなる. 心室細動が10分以上続いた場合, 患者の生存率は極めて低くなる. そのため, 心室細動には, 発生直後の治療が必要不可欠となる. 最近では, 駅・空港などの公共施設に, 素人でも操作できる自動体外除細動器(AED)が設置されている. このAEDは, 胸部に印加する高電圧パルスで心筋の痙攣を取

り除き、心臓本来のリズムを取り戻す装置である。従来の体外除細動器には以下の問題点が指摘されている。

- (a) 激しい痛み
- (b) 心筋に与えるダメージ
- (c) 皮膚の熱傷

これらの問題点は高電圧パルス印加の影響によるものである。

(2) 国内外の研究動向

最近では、医療分野でも不整脈の基礎的な研究(数理モデルの構築・シミュレーション・発生メカニズムの解明・不整脈除去治療の検討)が精力的に実施されている。一方、物理学分野では、不整脈の本質的な現象である「スパイラル/時空カオス」を再現するシンプルな数理モデルが古くから提案・検討されており、また、医療分野への応用を意識した、スパイラル/時空カオス抑制法の研究も実施されている。

(3) 着想に至った経緯

物理学分野で検討されている抑制法は、制御信号の形状とスパイラル/時空カオス抑制の関係をシミュレーションで調べているに過ぎない。一方、これまで報告者は、工学分野で体系化されたシステム制御理論を、物理学の複雑な現象(カオス・時空カオス・交通流等)に適用し、成果を挙げてきた。物理学分野の従来の研究成果を、報告者の視点から眺めると、以下の重要な2点が欠けていることに気付く。

* フィードバック制御が使われていない

* 制御系設計という視点が無い

これらの概念を従来の研究に導入したい。

2. 研究の目的

時空システムは、セルオートマトン、結合写像、結合微分方程式、編微分方程式などの数理モデルで表現される。本研究の目的は、興奮性媒体で代表される時空システムに生じる様々な非線形現象(スパイラル波、時空カオス、同期・クラスタリング等)の発生メカニズムならびに発生条件を詳細に調査し、これらの現象の抑制または制御する手法を、現実的な視点から提案・検証することである。

3. 研究の方法

本研究では、主に以下の課題(1)~(4)について検討を行った。

(1) セルオートマトンで記述される興奮性媒体の数理モデルに発生するスパイラル波

に着目し、その現象を数値実験で詳細に観察した。さらに、スパイラル波を効率よく消去するフィードバック制御法の提案・検証を行った。この制御法は、媒体中で興奮している領域の面積の極小時に、媒体全体に刺激を印加するものである。この制御法は2つの特徴を有する。

(a) 媒体全体の平均興奮度だけが観測可能であればよい。

(b) 媒体全体に同一の刺激を与えることができればよい。

これらの特徴は、媒体のセンシングならびアクチュエートが簡単であるため、現実システムへの実装を容易にしてくれる。

(2) 結合写像系に生じる時空カオス現象に着目し、その現象を効率よく消去する制御法の提案・検証を行った。この手法には、分散型の遅延フィードバック制御を活用している。したがって、制御則に目標値は不要であり、制御対象の構造が未知の場合でも比較的簡単に制御が行える。本研究課題では、定常状態の安定性をシステム制御の視点で解析し、さらに、定常状態に至る過渡状態の振舞を数値実験により詳細に調査している。

(3) 加齢などが原因で、興奮波を伝搬させない線維化組織が、ある割合で心筋を占めることは知られている。この状況を考慮した興奮性媒体の数理モデルに生じる非線形現象を数値実験で調査した。また、これらの非線形現象を抑制する外部刺激の与え方を検討した。特に、媒体の端を周期的に刺激する手法に着目し、その特性を詳細に調べた。

(4) 興奮性媒体の代表的な数理モデルである FitzHugh-Nagumo (FHN) モデルに生じる非線形現象の抑制手法の開発を試みた。特に、非線形特性が区分線形で記述できる FHN モデルについて深く検討した。数値実験だけでなく、解析的な検討、特にシステム制御の視点からモデルの近似を行い、興奮波の抑制手法を提案・検証した。

4. 研究成果

研究課題(1)~(4)の研究成果を以下に示す。

(1) セルオートマトンで記述される興奮性媒体に発生するスパイラル波のフィードバック制御に関する研究の成果は以下の通りである。

- ①興奮性媒体全体に単発のインパルスを印加すると、インパルス振幅が大きいときにのみスパイラル波が消去される。

②興奮性媒体全体に周期的なインパルス
を印加すると、単発インパルスに比べ、比較的小さなインパルス振幅でスパイラル波が消去できる。ただし、この振幅はインパルス間隔に大きく依存する。間隔が小さいほど、低い振幅でスパイラル波が消去できる。

③興奮性媒体に印加するインパルスのタイミングを、媒体全体の平均興奮度に依存（フィードバック）させると、単発インパルスに比べ、比較的小さなインパルス振幅でスパイラル波が消去できる。周期的なインパルス印加に比べ、この手法では、消去に必要なエネルギーが低く抑えられている。

これらの成果は、国際シンポジウム (International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications) で発表し、発表者が同シンポジウムで最優秀学生論文賞 (金賞) を受賞している。

(2) 結合写像系に生じる時空カオス現象のフィードバック制御に関する研究成果は以下の通りである。

①分散型の遅延フィードバックは、結合トポロジーが不規則であっても時空カオスを消去することができる。

②分散型の遅延フィードバックのフィードバックゲインは、結合トポロジーの影響を受けない系統的な手法で設計できる。

③凍結した時空パターンは、分散型の遅延フィードバックで安定化できない。ただし、不安定化用遅延フィードバックの追加や結合強度の変化によって、その凍結パターンを解凍させることで、平衡状態に安定化できる。

④分散型の遅延フィードバックによって安定化された平衡状態は、結合強度が強いほど、外乱に対してロバストである。したがって、安定化前は結合強度を弱め、安定化後は強める戦略が有効である。

上記の結果は、国際学術論文誌 (International Journal of Bifurcation and Chaos) に掲載された。

(3) 線維化を考慮した興奮性媒体に生じる非線形現象の抑制に関する研究成果は以下の通りである。

①線維化の割合が少ない(10%以下)とき、

線維化を考慮しない場合とほぼ同等の制御性能が得られる。

②線維化の割合が多い(10~20%程度)とき、低い周波数の外部刺激でないと非線形現象の抑制ができない。

③上記の成果は、線維化の割合、興奮波の伝搬速度、興奮波の速度の乱れ、などの関係から説明ができる。

これらの成果は、国内の学会 (2件) ならびに国際シンポジウム (International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications) で公表した。

(4) 区分線形 FHN モデルに生じる興奮波の抑制に関する研究成果は以下の通りである。

①興奮変数と回復変数の速度に大きな差があると、外部刺激と興奮波の伝搬速度の関係が1次遅れ系で記述できることを導いた。

②この1次遅れ系を用いることで、興奮波を抑制するコントローラが古典制御理論や現代制御理論で簡単に設計できることを示した。

③フィードバック制御だけでなく、一方的な周期刺激の設計も簡単にできることを明らかにした。

④1次元空間 FHN モデルに対して設計したコントローラは、2次元空間 FHN モデルにもそのまま利用可能であることを解析的に保証した。

⑤これらの解析的な成果が正しいことを数値実験で検証した。

研究成果は、国内の学会(2件)で発表し、その後、国際学術論文誌 (Chaos) に採択された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① K. Konishi, M. Takeuchi, and T. Shimizu, Design of external forces for eliminating traveling wave in a piecewise linear FitzHugh-Nagumo model, Chaos, 査読有, 2011

② K. Konishi, Decentralized delayed

feedback control of coupled map lattices on irregular network topologies, International Journal of Bifurcation and Chaos, 査読有, vol. 20, 2010, 3351-3358

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :

[学会発表] (計 6 件)

- ① 入澤正樹, 小西啓治, 原尚之, 線維化を考慮した興奮性媒体に生じる時空カオスの媒体境界周期刺激による抑制とそのメカニズム, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2011年03月10日, 東京
- ② 竹内将司, 清水剛, 小西啓治, 小亀英己, 原尚之, 区分線形FHN系に伝搬するパルスを消滅させるフィードバック制御系の設計, 電気関係学会関西支部連合大会, 2010年11月13日, 滋賀
- ③ M. Irisawa, K. Konishi, N. Hara and H. Kokame, Suppression of spatio-temporal chaos in excitable media with nonexcitable cells, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2010年9月7日, クラクフ (ポーランド)
- ④ 入澤正樹, 小西啓治, 原尚之, 線維化を考慮した興奮性媒体に生じる時空カオスの抑制, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2010年07月13日, 石川
- ⑤ 清水剛, 小西啓治, 原尚之, 小亀英己, 一次元区分線形FHN系に生じるパルスを消滅させる周期的外力の設計, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2010年1月22日, 岐阜
- ⑥ H. Yoneshima, K. Konishi, and H. Kokame, Feedback control of spiral waves in a cellular automata model of excitable media, Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008年9月9日, ブダペスト (ハンガリー)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 啓治 (KONISHI KEIJI)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 90259911

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :