

氏名	小松崎 俊彦
生年月日	
本籍	茨城県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第275号
学位授与の日付	平成16年3月25日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	創発的手法による振動・音響系のモデル化と制御に関する研究
論文審査委員(主査)	佐藤 秀紀(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	西川 清(工学部・教授) 神谷 好承(自然科学研究科・教授) 岩田 佳雄(工学部・教授) 森下 信(横浜国立大学・教授)

## 学 位 論 文 要 旨

In the present study, emergent computations are applied to modeling and control of vibration and acoustic problems. Such emergent computations include Genetic Algorithms, Neural Networks and Cellular Automata which offer promising technology to overcome difficulty in solving engineering problems by conventional analytical approach. First, the Cellular Automata is applied to model the acoustic wave propagation problem and the granular flow of an impact damper. Compared with the conventional analytical method, it is addressed that the modeling techniques with Cellular Automata provide advantages on the point of computation efficiency and numerical stability due to the discrete treatment of time and space. Second, an active control technique is developed using neural network. The performance of the controller is discussed experimentally as well as numerically for two cases of active noise control problems, one that the noise is transmitted into an enclosure as a structural-acoustic coupled system, and the other the pressure oscillation is induced by combustion instability of solid rocket motor. Furthermore, the adaptive neural network controller is developed which rearranges its connection structure suitably according to the given problems. The results show that the controller demonstrates good performance in attenuating noise and vibration adaptively and efficiently.

振動の発生は一般に機械の性能や信頼性の低下の要因となるばかりでなく、人体に与える振動障害や振動公害、さらには騒音の発生要因となるなど様々な振動・騒音問題を引き起こすことになる。近年、環境問題への関心がますます高まりつつある中、安全性を完全に保証した上で使用上の快適さが各種機械に対して必須の条件となっており、機器開発においては振動、騒音のような对人的要素が商品価値の主要条件となっている。したがって、その防止は重要な課題である。振動・騒音対策を実現する技術的な方法としては、制振や制音のために必要なエネルギーが外部から与えられて作動するかどうかで大きく受動的、能動的手法に分類することができる。

受動的な振動対策としての振動絶縁および振動吸収には、各種の制振材料や制振装置が広く用いられている。また、騒音対策としては、受動的な方法として遮音壁、吸音材の適用、消音器の設置などが挙げられる。しかし、受動的な技術は経験的要素が効果に大きく影響することや、重量や設置上の問題により設計上の物理的な制約を受けるためその適用には限度があること、およびこれら受動要素は制御範囲が狭く、高周波数域と比較して特に低周波領域での制振・制音効果が期待するほど得られないことなどが問題点として挙げられる。

それに対し最近では、能動的に振動・騒音を抑制する手法の開発が盛んに行われており、幅広い周波数帯域、特に受動的な抑制手法の不得意とする低周波域における高い制御効果を得ることが可能となった。その背景として、近年における制御技術に関するソフトウェアとハードウェアの急速な進歩と普及がある。能動制御は多様な特性を持つ制御器の実現が比較的容易であり、受動要素と比較して機械に要求される仕様に柔軟に対応できる特徴を持つため、様々な機械に導入されている。

振動・騒音に対して各種の制御手法を適用するにあたり、まず考えなければならないのはシステムのモデル化であり、振動・騒音の発生を精度よく予測する数値計算手法の開発が必須である。しかし、一般に用いられている数値計算手法では、モデル化による近似、低次元化に伴う打ち切り誤差などが必ず存在し、また解析対象が大規模になるに従い方程式の数は膨大となり、計算時間とともに計算コストは増大する。実在のシステムは大規模分散化、不確定性および雑音の混入、非線形特性の介在などが列挙され、システムの完全なモデル化が可能な場合は稀である。制御対象の動特性が複雑で特性を明確にするのが難しい場合や、特性が時間的に変動する場合など、モデル化が不完全である場合には十分な制振効果は期待できない。さらに、非定常解析を行う場合の手順が一般に複雑であり、熱などの環境的要因による特性変動、非線形性などを考慮することが一般に困難であること、離散系の取り扱いが難しいことなど、解決すべき課題は多い。

こうした従来の手法では解決困難な工学的問題に対して、近年、生物や自然現象に見られるパターン形成や生物の情報処理機構、適応化の過程を人工的に模倣し、設計工学における最適化や制御工学、現象のモデル化等、工学的問題へ応用する動きが活発に見られるようになった。これらの手法は創発的計算手法と呼ばれ、遺伝的アルゴリズム、ニューラルネットワーク、セルオートマトンなどがこれにあたる。創発的計算手法により、それらのアナロジーの元となる生命現象への理解はもちろんのこと、人工生命への応用や、従来の方程式に基づく手法ではモデル化が困難な工学を含む一般の現象をモデル化し理解を深めるための応用研究が盛んに行われている。さらに、複雑な挙動を示し、動特性の変動する系および非線形系などモデル化が困難とされる制御対象に対して、システムのモデル化と制御系を設計するための方法としてこれらの創発的手法を応用した方法が検討されており、モデル化を効率的に行い、またそのモデルに対して、最適かつ適応能力を持つコントローラを設計できる可能性がある。

しかしながら、これらの創発的計算手法を現象のモデリングに適用する際の問題点として、モデルに含まれるパラメータ決定の恣意性が挙げられる。モデル化の過程において、パラメータの決定は、解析者による現象の観測結果に基づき、結果的に実現象とシミュレ

ーションが合致するように行われるが、その一般的なアルゴリズムは存在しない。従来のモデル化手法では定式化が困難な現象を再現する有力な手段としてその優位性が主張される一方で、モデル構築の手順やモデル化の妥当性を検証する一般的方法について明確にする必要がある。また、創発的計算手法の制御への適用についても同様に、対象とする問題によって経験的にパラメータを決定する必要があること、およびパラメータの選択に依存した局所解への収束などが挙げられる。安定かつ効率的な制御系を実現するには、問題に応じて適切なパラメータを自動的に構成するシステムの構築が求められている。

以上の問題点を踏まえ、本研究ではまず現象をモデル化する新しい手法の提案を行った。近年、系全体に関する方程式の構成を前提とする従来のモデル化手法では解析困難な工学的現象に対し、その構成要素間の相互作用を重視したモデル化を行う新たな方法論の導入が試みられているが、このような現象を解くためのアプローチとしてセルオートマトンと呼ばれるシミュレーション手法をとりあげる。本研究では、セルオートマトンの工学的応用を目指し、振動・音響系のモデリングに関わる問題として音場に関する波動伝播問題および容器内における粒子の衝突力を利用した制振装置である粒状体ダンパのモデル化について取り扱った。これらの現象は支配方程式によって記述が可能であり、従来からも様々なモデルが提案されているが、セルオートマトンの特徴を生かし、モデル化の簡便性、計算処理の効率化の観点において従来よりも優れたモデリング手法について提案した。前者については、1次元音響管および2次元自由空間内の点音源による音場をセルオートマトンを用いて再現し、波動方程式による解析解との比較を行った。また、空間に障害物がある場合、波動の伝達媒体に密度差がある場合、音源が移動する場合など、方程式による解法では一般的に手順が煩雑になるような音場についても、セルオートマトンにより比較的容易にモデル化可能であることを示した。さらに後者については、セルオートマトンを粒状体解析に適用し、運動方程式に基づく従来手法と比較して短時間に、かつ単純な規則により粒状体の挙動を再現することを試みた。封入粒子と壁面との衝突力を利用して制振を行う粒状体ダンパをモデル化の対象として、振動する容器内の粒子挙動をモデル化するとともに、制振器としての力学的評価を行った。粒子挙動パターンおよび主振動系の制振効果について、模型構造物の制振実験および個別要素法によるシミュレーション結果と比較検討し、粒子の挙動について定性的な一致を得た。さらにセルオートマトンと個別要素法によるシミュレーションとの計算時間に関する検討を行い、特に計算時間の観点において提案するモデルが優位であることを示した。

次に、非線形写像能力、汎化能力、適応性に優れたニューラルネットワークを適応制御システムとして採用し、振動・音響制御問題に適用した。制御対象としては、まず車両・航空機等の輸送機を想定し、外部の音源により車室内に騒音の伝達される系として箱型空間の簡略モデルを考え、外部の音源により空間内部へ伝達される騒音を抑制することを目指すとして、ニューラルネットワークによる能動騒音制御を行い、構造・音場の連成する複雑なシステムに対しても良好に制御可能であることを理論的および実験的に示した。さらに、燃焼不安定性に起因して固体燃料ロケット内に発生する圧力振動を制御対象とし、二次的な燃料を付加してその流量をニューラルネットワークシステムにより制御した。オンラインシステム同定と組み合わせることで過渡的な運転状況、モデルの不確定性、外乱お

よび制御付加に伴って発生し得る系の不安定性の要因となるモードに対して適応的かつロバストな制御が可能であることを示した。これらの結果より、ニューラルネットワークを制御に用いることで従来の制御系では取り扱いが困難であった制振対象構造物の非線形性、振動特性が不明確な対象、多様な外乱に対しても柔軟に対応できることを示した。

続いて、ニューラルネットワーク構造の自己組織化について取り扱い、制御対象に応じて適したネットワーク構造を自動的に生成する手法について検討した。ニューラルネットワークは、優れた写像能力を有する一方で、パラメータの選択によっては解が極小値に収束し十分な精度が得られないなど、信頼性や安定性の面で問題点も多い。この問題を解決する方法として、ネットワークの構造の組み換えに注目した。ネットワーク構造の最適化を図る手法としては、初期に大きな構造を設定し、不要な結合を順次削除することで構造の最適化を行う手法が既に幾つか提案されているが、動的問題を取り扱う場合、ネットワークを制御系として導入した後、対象の特性変化に応じて逐次最適化を図ることは、計算時間の観点から適さない。そこで、生体内のネットワーク形成過程を模擬し、結合の無い状態からネットワークを成長させ、問題に適した構造を自動的に形成可能な自己組織化ニューラルネットワークを提案し、音響制御問題に適用した。ネットワークを自己組織化させる手法として、二次元平面上に並んだニューロンが互いに相手を探索しながら結合する様子をセルオートマトンにより再現した。その結果、ネットワーク構造の生成が自動的にかつ迅速に行うことが可能であり、ネットワークの学習と結合生成を同時に行うことで、系の動特性変化に迅速に対応できることを示した。

しかし、自己組織化ニューラルネットワークでは、できるだけ少ない結合で迅速に制御可能なネットワークを自動的に構築することが可能であるが、常に良好なネットワーク構造が得られるとは限らないこと、あるいは生成される結合構造に再現性がないことなど、問題点も多い。また、構造の発見が高速に行える反面、複数の問題に同時に対応するためには、一度発見された構造を破棄して再探索を行うことは、必ずしも効率的とは言えない。これらの問題を解決するには、発見された既知のネットワーク構造を記憶する機構を設けること、および与えられた問題に応じて必要な構造を自律的に切り替える機能を有することが必要と考えられる。そこで、本研究における最後の提案として、与えられた制御対象および外乱などの条件に対して最適制御可能なネットワーク構造が既知である場合、これらを記憶として制御系に内包させ、制御対象の特性変化に応じてこれらの記憶から適切な構造を選択・再利用可能な構造可変型のニューラルネットワークを構築した。各種の振動系に対して、まずは結合数、同定精度および制御誤差の点において最適なネットワーク構造を遺伝的アルゴリズムを用いて決定した。続いて、これらの制御対象と最適ネットワーク構造の組み合わせを全て記憶させ、制御対象が移り変わる場合に各々の最適化ネットワークが想起されることを数値シミュレーションによって確認した。本手法により、既知システムに対して効率的に制御可能なネットワーク構造を適用することが可能となり、システムの特性変化により再構築の必要性が生じた場合でも、最適化手法を改めて用いることなく構造の組み換えが可能のため、迅速に対応できることが示された。

以上の結果より、本研究で提案した創発的計算手法に基づくシステムのモデル化手法、および振動・音響系を対象とした制御の有効性が確認され、比較的単純な規則により効率

的にモデル化可能であること、および効果的かつ適応能力を持つコントローラを設計可能であることが示された。

## 学位論文審査結果の要旨

平成 15 年 11 月 21 日の第 1 回論文審査委員会、および平成 16 年 2 月 6 日の口頭発表後に開催された第 2 回論文審査委員会において審査した結果、以下の通り判定した。

本論文はセルオートマトン、ニューラルネットワークなどの創発的手法を用いて種々の振動・音響系のモデル化と制御について研究したものである。モデル化についてはセルオートマトンを用いて音響解析としての波動伝播問題を種々の条件下で解析している。また、粒状体ダンパの粒子・容器挙動をモデル化して制振特性を解析している。いずれも新しい局所ルールを提案して計算効率およびモデル化の簡便さの点でその有効性を明らかにしている。制御については、ニューラルネットワークを利用し、外部音源により輸送機内に伝達される騒音の制御および固体燃料ロケットに発生する圧力振動の制御を取り扱い、系の非線形性、不確定性、非定常性などに対応できる新しい適応制御系を提案し、その有効性を検証している。また、問題に適した構造を自律的に生成する、セルオートマトンを利用したニューラルネットワークの自己組織化手法を提案し、汎用性を高めている。さらに、制御対象の特性変化に対し、記憶したネットワークを自律的に適応させる構造可変型ニューラルネットワークコントローラを提案し、その有用性を明らかにしている。

以上、本論文は創発的手法を用いて振動・音響系のモデル化と制御について研究し、独創的な方法により手法の高度化、汎用化に大きく寄与したものであり、工学上重要な知見を得たものと認められる。よって博士（工学）論文に値するものと判定した。