

学位論文題名

A Study on Chaotic Neural Oscillator for Ill-Conditioned Robots

(不定状況ロボット向きカオスニューラルオシレータに関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、詳細なモデル化が困難なロボットシステムにおいて、環境・身体・制御の各ダイナミクスを互いの相互作用から同相のダイナミクスに引き込むことでロボットの行動を生成しようとする、リズムダイナミクス・アプローチを提案するものである。

近年のロボットに関する要素技術の発展に伴い、高度化したロボットの動作環境の拡大が期待されている。一例として、人間とコミュニケーションを介して活動する家庭内福祉ロボット、惑星探査などの未踏地ロボットなどが上げられる。

従来の工学的設計では、設計者が設計対象としての問題領域で起こりうる事象全てを把握し、この問題領域に対して、設計対象が具備すべき仕様(センサやアクチュエータの種類・個数)を満たすように必要な原理(理論, アルゴリズム, 数式)を当てはめるような作業を行ってきた。このような設計手法により決定された問題領域内において設計されたシステムは、普遍的で制御可能であり予測的振る舞いを示し、頑健で信頼性の高いものとなる。しかし、問題領域が常に変化する可能性がある動的環境では、設計者が事前に変化を予測し完全なルールを設計することができない。そのため、問題領域を分割しサブ問題を解くことなどによって対処してきたが、問題が複雑化・肥大化するにつれ、設計者によって複雑に絡み合った要因を制御理論的な形で定式化(モデル化)することが困難となっている。

ロボットシステムが複雑化・多様化するにしたがって、(1)時変性、(2)相互作用性、そしてこの2つから派生する(3)モデル化困難性、を考慮した制御系の設計が必要となる。本論文において、これら3要素を考慮して設計するロボットシステムを *ill-conditioned robot* として定義している。これは、従来手法での制御が設計者によって整備された状況、つまり、*well-condition* であったことに対するアンチテーゼとして *ill-condition* としているものであり、*ill-condition* は特別なものではなく、生物や人工物を含む実在する全ての実体に当てはまる特性であるといえる。

本論文では、この *ill-conditioned robot* の制御をリズムダイナミクス・アプローチにより行うものである。リズムダイナミクス・アプローチでは、制御系と身体系との相互作用に関する評価を環境と身体系との相互作用の結果から求め、それを基に制御系のダイナミクスを変化させている。従来、このようなリズムの発生はCPG (Central Pattern Generator) 等のペースメーカー方式により実現され、歩行ロボットなどの歩様生成に応用され研究されている。しかし、CPGでは、全ての振動子が引き込み現象を通して同一のリズム周期で動作し多様性を失うこと、また、各振動子間の結合が固定的でありその構成変更は不可能であることが問題として挙げられる。そこで本論文では、リズムダイナミクスの発生・制御・維持(再利用)が可能なカオスニューラルオシレータシステムを導入している。

最後に、数種類のロボットによる自律的行動獲得に対して、提案するリズムダイナミクス・アプローチが有効な方法論であるということが明らかにされている。

本論文は、6章から構成されている。以下にその概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景、現状の問題点、研究目的について述べている。はじめに、ロボット設計におけるアプローチ手法について分類しその特徴をまとめ、比較することで従来の制御手法の問題点を明らかにしている。次に、ill-conditioned robot の特徴について述べ、それを定式化している。さらに、本論文で提案するリズムダイナミクス・アプローチについて概念を述べ、その特徴を各トピックスごとにまとめている。

第2章では、提案するリズムダイナミクス・アプローチの具体的な制御手法として、カオスニューラルオシレータシステムについてとりあげている。このカオスニューラルオシレータシステムは、リズムダイナミクスの発生にカオスニューロンモデルを基礎神経素子とする『カオスニューラルネットワーク(CNNs)』、カオスサーチと安定周期との切り替えについては『Dynamical Learning Method (DLM)』、そしてダイナミクスの維持と再利用を考慮した『階層型モジュールネットワーク構造』による構成となっている。ここでは、これら各要素に関してその背景や性質などについて述べ、さらに基礎的な実験を行うことでその能力についてまとめている。この実験結果から、カオスニューラルオシレータシステムが評価にしたがい多様なリズム形成能力があること、また、リズムの再構成が可能であることが明らかにされている。

第3章では、次章で実験を行う SMA-Net Robot についてその詳細な特性について論じている。SMA-Net Robot は、構造的柔軟性を実現するために多数のアクチュエータや弾性材料を組み合わせた構造となっており、制御対象として大自由度を有している。また、SMA-Net Robot は、アクチュエータとしての SMA スプリングの回復力と床面の摩擦力とのバランスにより動作可能であるという動作特性をもっている。以上から、この SMA-Net Robot が本論で指摘している ill-conditioned robot であると認識し、環境要因・内部要因・モジュール間の競合要因の3要因が問題点として挙げられることを指摘している。

第4章では、提案アプローチの有効性をカオスニューラルオシレータシステムによる SMA-Net Robot の行動生成に関する実験を行い検証している。ここでは、ターゲット追従のタスクを様々な結合形態の SMA-Net Robot に関して行動生成の実験を行っている。また、環境変化に関しても実験を行い、提案手法の適応性に関する議論を行っている。さらに、それぞれの実験で構築されたネットワークの変化の様子についても検証を行い、システムのロバスト性・適応性・再利用性について議論している。このロボット実験において、本提案システムが、環境変動に対しそれまでに獲得したリズムのいくつかを再利用することで素早い状況復帰が可能であるという知見が得られた。

第5章では、提案手法を2輪型ロボットへのナビゲーション問題に適用した実験について説明している。この実験において、単なるセンサーアクチュエータという行動マップからは解決できない問題に対して、リズムダイナミクスの導入により局所情報から大域情報への変換が可能となり、それにより適応行動が生成できることが明らかになった。

第6章において、論文全体のまとめと総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 大 内 東
副 査 教 授 大 森 隆 司
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

A Study on Chaotic Neural Oscillator for Ill-Conditioned Robots

(不定状況ロボット向きカオスニューラルオシレータに関する研究)

従来型のモデルベースアプローチの成功は、近年の二足歩行型ヒューマノイドロボットの正確な歩行動作の獲得に見られる。しかし、それらの歩行ロボットでは動作環境や制御順序などが、あらかじめ設計者により設定されたシステムであるため、環境変動などの予測外の状況に対する柔軟性に欠けている。これに対して、より柔軟な行動を起こせるロボットの実現に向けて、実際の生物から柔軟な機能を発現するための機能メカニズムを獲得しようとする研究が盛んに行われるようになってきている。ロボットが、生物のもつ柔軟性や適応性を獲得するためには、設計者に頼らない自己獲得のためのメカニズムが必要であるが、それに対する決定的な方法論は提唱されておらず、その確立が望まれている。

本学位請求論文では、制御対象であるロボットがもともと備えているダイナミクスを環境との相互作用を通して同調させることにより、その環境に適した行動を自律的に生成するためのメカニズムを開発、実証したものである。本論文では、従来手法において外乱として処理されてきた(1).時変性、(2).相互作用性、そしてこの2つから派生する(3).モデル化困難性、を考慮して設計するロボットシステムを *ill-conditioned robot* として定義している。このモデル化困難な *ill-conditioned robot* に対して、リズムダイナミクス・アプローチにより、環境・身体・制御の各ダイナミクスを互いの相互作用から同相のダイナミクスに引き込むことで行動生成を実行可能とする方法論を展開している。

このリズムダイナミクス・アプローチを実現するために、CPG (Central Pattern Generator) モデルに代わるリズム発生システムとして、本論文ではカオスニューラルオシレータシステムの導入を行っている。カオスニューラルオシレータシステムは、リズムダイナミクスの発生・制御・維持(再利用)を可能としており、ダイナミクスの相互作用を通じて、ロボット全体で統一された情報リズムパターンを発生するためのシステムとなる。

本論文の概要は、以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景、現状の問題点、研究目的、本論文で定義する *ill-conditioned robot* の特徴について述べている。さらに、本論文で提案するリズムダイナミクス・アプローチについてまとめている。

第2章では、提案するリズムダイナミクス・アプローチの具体的な制御システムであるカオスニューラルオシレータシステムについて論じている。その構成として、リズムダイナミクスの発生にカオスニューロンモデルを基礎とする『カオスニューラルネットワーク(CNNs)』、適切な結合荷重を学習する学習法として『Dynamical Learning Method (DLM)』、そしてダイナミクスの維持と再利用を考慮した『階層型モジュールネットワーク構造』を適用している。基礎実験の結果から、このシステムが評価にしがたい多様なリズム形成能力があること、また、リズムの再構成能力があることの知見が得られている。

第3章では、実際の *ill-condition robot* の例として *SMA-Net Robot* をとりあげている。*SMA-Net Robot* は、構造的柔軟性を実現するために多数のアクチュエータや弾性材料を組み合わせた構造から制御対象として大自由度を有しているが、環境要因・内部要因・モジュール間の競合要因の3要因が問題となり、その制御を困難にしていることを指摘している。

第4章では、カオスニューラルオシレータシステムによる *SMA-Net Robot* の行動生成に関する実験を行い、その有効性を検証している。本システムが、環境変動に対しそれまでに獲得したリズムのいくつかを再利用することで素早い状況復帰が可能であるという知見が得られており、さらに、構築されたネットワークにおいてシステムのロバスト性・適応性・再利用性についても論じている。

第5章では、提案手法を2輪型ロボットへのナビゲーション問題に適用し、単なるセンサーアクチュエータという行動マップからは解決できない問題に対して、リズムダイナミクスの導入により局所情報から大域情報への変換が可能となり、それにより適応行動が生成できることで有効性を示している。

第6章において、論文全体のまとめと総括を行っている。

これを要するに、本論文は、不定状況ロボット問題において、ロボットが自身と環境とのダイナミクスをリズムパターンとして獲得することにより、環境変化に対しても、統合された行動生成を可能とする制御メカニズムを与えたものであり、ロボット工学及び、複雑系工学、情報工学の分野に貢献することは大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。