

自律歩行ロボットの制御を行う

生物規範型歩行生成機構の集積回路化に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、センサエージェントへの応用を目的とした、自律移動ロボットの制御を行う生物規範型歩行生成／制御機構の集積回路化に関するものである。

センサエージェントとは、センサを自律した行動主体（エージェント）とし、自律分散的にセンシングを行うマルチエージェントシステムである。センサエージェントにおいて、エージェントはセンサによって獲得した環境情報を利用し、自律的に行動あるいは情報処理を行う。また、ネットワークを介して複数のエージェントと協調し、環境の認識や理解、構造化を行う。センサエージェントは、被災地など極限状況下におけるセンシングに関連して今後重要となる技術のひとつであり、その実現のためにはセンサ、移動機構および通信機構など各要素技術の集積化が不可欠である。

本研究では、センサエージェントに必要となる自律移動機構として生物規範型歩行生成／制御機構の集積回路化による実装について検討を行った。センサエージェントは未知環境下でのセンシングを目的としているため、その移動制御は予測不可能な環境の変動に対して実時間で自律的かつ適応的に行わなければならない。これは、従来の制御手法では実現することが難しいタスクのひとつである。そこで、本研究では生物規範型歩行生成／制御機構に着目した。

生物の歩行や走行、遊泳、飛翔などの移動運動は、Central Pattern Generator (CPG) とよばれる中枢神経系が生成する周期運動を基本として行われる。この CPG によって生成される周期運動はセンサフィードバックを介して身体系や環境と力学的相互作用し、その結果として自律的かつ適応的に歩行運動が生成される (Global Entrainment)。つまり、生物は神経系、身体系および環境の間の相互作用を最適化することによって、未知の環境において自律適応的な歩行運動を実現している。この Global Entrainment の概念にもとづいてロボットの歩行制御を行う手法が生物規範型歩行生成／制御手法である。

これまでの先行研究において、生物規範型の歩行生成／制御手法に関する研究は、理論と応用の両面から進展してきた。それらの研究によって、次の利点が示されている：(1) CPG が生成する周期運動は、制御対象である物理系（身体系）の協調を図り、制御変数の実効的な自由度を低減する。(2) その結果、単位時間当りの計算量が削減される。(3) 外乱や環境の変動に対して、自律適応的な安定した歩行が実現される。

本論文では、これらの利点に着目して、生物規範型歩行生成／制御機構のアナログ集積回路化による実装について検討した。本論文は、8章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べるとともに各章の概要を記している。

第2章では、生物規範型歩行／生成制御手法の概要と先行研究における実装手法について述べ、本研究との関連を明らかにする。

第3章では、電圧モードで動作するCPGのアナログ集積回路化について提案する。CPGは非線形振動子の結合系として記述できる。歩行運動において、脚の動きを多重振子と見なし、CPGを構成する各振動子は各関節を駆動する信号を生成するとすれば、歩行パターン（歩容）は位相同期した発振パターンと考えることができる。ここでは、生物の歩行運動の多様性に着目し、脊椎動物の典型的な歩容に対応した発振パターンの生成／制御を行うCPGモデルのアナログ集積回路化を行った。回路シミュレーションにより、CPG回路が歩容に対応した発振パターンを安定に生成すること、および発振パターン間の遷移を速やかに行えることを確認した。また、実際に回路を試作した際に予想される電流源や素子の不整合が回路動作に与える影響について検討した。

第4章では、フローティングゲートMOSFETによる電圧モードアナログ集積回路化について提案する。電流源や素子の不整合による回路動作への影響を軽減するために、CPG回路を構成する振動子回路間の相互作用にフローティングゲートMOSFETの容量結合を利用した。回路シミュレーションおよび試作チップの評価により電流源や素子の不整合の影響を改善できることを確認した。

第5章では、電流モードで動作するCPGのアナログ集積回路化について提案する。生物規範型歩行生成／制御手法の回路化において、センサ入力を回路の動作に効果的に反映させることが重要である。そのためには、外部からの入力に応じて回路の生成する発振パターンの振幅および周波数が広範囲に制御できることが望ましい。そこで、回路内部での状態および信号（相互作用）を電流によって表現し、外部入力に対する回路の発振周波数および振幅の制御性を向上させた。シミュレーションにより、CPG回路が生成する発振パターンの周波数と振幅を広範囲に制御できることを確認した。

第6章では、提案回路のセンサフィードバックに対する同調特性について調べた。

第7章では、提案回路を実際に自律歩行ロボットに実装するために必要となる回路パラメータやフィードバックゲインの設定に関して検討を行った。

第8章では、これらの結果を総括するとともに、センサエージェントを具現化するための今後の展望について述べ、本論文の結論とする。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 雨 宮 好 仁

副 査 教 授 長谷川 英 機

副 査 教 授 酒 井 洋 輔

副 査 助教授 浅 井 哲 也

学 位 論 文 題 名

自律歩行ロボットの制御を行う

生物規範型歩行生成機構の集積回路化に関する研究

本研究は、四足歩行を行う自律歩行ロボットを対象として、その歩行制御を行うためのアナログ集積回路の設計方針を確立したものである。

近年、センサエージェントと呼ばれる自律分散システム概念が研究対象として注目を浴びるようになった。センサエージェントとは、各種センサを搭載した自律移動ロボットをエージェント（構成要素）として、その多数集合体からなる自律分散形の行動・作業システムである。各エージェントは自己のセンサで収集した環境情報をもとに自律的に動作する。同時に通信ネットワークにより他のエージェントと情報を交換して周囲状況の認識と理解を行い、他エージェントと協調しながら共通の目標に向かって行動する。センサエージェントはハチやアリのような社会性昆虫の集団に似ており、集団全体がひとつの統一体として明確な意志と目標をもち目標達成に向けた必要な処理と作業を実行する。

センサエージェントはその構成要素として様々な移動方式のロボットを擁することになるが、その中に四足歩行を行うロボットを必ず含む必要がある。なぜならセンサエージェントの行動場は多種多様な地形環境であり、四足歩行でなければ行動できない状況も考えられるからである。四足歩行は移動方式の中で最も適応性が高いものであり、自然界の動物も大半がこの移動方式をとっている。

本研究では、四足歩行の制御システムに焦点を絞り、その制御システムを集積回路で実現することに目標を置いた。四足歩行は従来の制御手法では実現が難しいので、本研究では、自然界の四足動物を規範として制御機構を考えることを考えた。動物の歩行は Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる中枢神経系が発生する周期運動を基本として行われる。視覚や触覚を介して計測された実際の動きがこの CPG 周期運動にフィー

ドバックされ、その結果として自律的かつ適応的な歩行運動が生成される (Global Entrainment)。本研究では、この CPG に相当する機能を解析し、それをアナログ集積回路で実現した。センサエージェントのロボットは小型かつ低電力動作が要求されることが多いので、そのような場合には CPG の機能を効率良く生成するためにアナログ非線形回路を使用することが不可欠である。

本研究では、CPG の機能を実現するアナログ集積回路を設計するに際して必要な各種の検討事項を総合的に解析し対処している。本研究で得られた主要な成果は以下のとおりである。

(I) CPG モデルのアナログ集積回路化

CPG モデルを連立常微分方程式 (状態方程式) により記述し、モデルの状態変数を物理量に対応させることにより、アナログ集積回路化した。状態変数を対応させる物理量および相互作用の仕方について回路構成を検討し、次の 3 つの回路を提案した。

(i) 電圧状態表現-電流相互作用型 CPG 回路

(ii) 電圧状態表現-電圧相互作用型 CPG 回路

(iii) 電流表現-電流相互作用型 CPG 回路

また、これらの回路を実用化するうえで問題となる、(1) 回路の動作領域の制限、および (2) 素子特性変動の影響、について検討した。

(II) CPG 回路を組み込んだフィードバック制御系の設計方針の確立

CPG 回路の制御対象としてロボットの関節機構を想定したフィードバック制御系を構成し、制御系の伝達特性に応じた回路動作について明らかにした。その結果、CPG 回路を実用化するうえで問題となる上記 (1) および (2) を改善できることをシミュレーションにより示した。

これを要するに、本研究は生物規範型の四足歩行運動を生成・制御するためのアナログ集積回路およびそれを組み込んだ制御系の設計方針を確立したものであり、自律歩行ロボットとセンサエージェントシステムの研究分野に対して貢献するところ大なるものがある。

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。