

論文の内容の要旨

氏名：森 下 克 幸

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：ハードウェアによる受容細胞モデルの開発と歩行ロボットへの実装に関する研究

ロボット市場の拡大と共に多様なロボットの開発が求められる。将来的な人手不足の解消や未曾有のパンデミックへの対策として、人の業務を代替可能な自律型ロボットが注目されている。自律型ロボットの1つに、自律型歩行ロボットがある。自律型歩行ロボットは、車輪型ロボットが苦手とする不整地でスムーズな移動が可能な移動ロボットである。したがって、運搬や検査用のロボットとして期待されており、プログラムベースの制御を用いた自律型歩行ロボットの研究や開発が行われている。しかし、未だ動物より優れた自律行動が可能な自律型歩行ロボットは開発されていない。動物の優れた自律行動をロボットへ実装する為に、動物の神経回路を模倣する研究がある。動物の神経回路は現在の自律型歩行ロボットシステムと比較して低い消費エネルギーでありながら、移動速度に応じて最も効率的な歩容に切り替えるなど、周囲の環境や状況の変化に柔軟に対応した自律行動を生成する。動物の神経回路を模倣することで、プログラムベースとは異なるアプローチで優れた自律型歩行ロボットの開発に繋がると期待される。既に生理学実験などで解明されている神経回路の構造や機能を模倣することで、動物の自律行動の一部を模倣した歩行ロボットの研究や開発が行われている。神経回路を模倣する研究は主に形式ニューロンモデルが使用される。形式ニューロンモデルは単純な数式で表現するモデルである為、システムの実装や変更が容易である。しかし、生体の神経回路とは異なるメカニズムで情報伝達する。生体の神経回路のようにスパイクで情報伝達するモデルにスパイクニューロンモデルがある。スパイクニューロンモデルはスパイクによる情報伝達が可能である為、生体の神経回路のようにスパイクの頻度やタイミングによる情報伝達が可能である。

日本大学の齊藤健らは、スパイクニューロンモデルの1つであるパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて神経回路モデルを開発し、歩行ロボットの制御に応用する研究を行っている。これまでに昆虫型マイクロロボットや自発的に歩容を生成する四足歩行ロボットに神経回路モデルを搭載し、動物のような歩容の生成に成功した。しかし、昆虫型マイクロロボットは歩容の切り替えに外部から信号が必要であり、自発的に歩容を生成する四足歩行ロボットは圧力のセンシングとサーボモータの駆動信号の生成にマイクロコントローラのデジタル制御が必要である。生体の神経回路のメカニズムを歩行ロボットに実装するには生体の感覚神経回路を模倣した神経回路モデルが必要である。

本論文は感覚神経細胞である受容細胞の機能を模倣した受容細胞モデルの開発と歩行ロボットへの搭載に関する研究を行い、研究の成果をまとめたものである。受容細胞モデルは受容細胞の機能を模倣したパルス形ハードウェアニューロンモデルである。受容細胞は感覚器内に存在する神経細胞で、特定の刺激に反応してスパイクの出力パターンが変化することで情報伝達する。受容細胞モデルは搭載するセンサへの入力によりパルス波形を出力し、センサへの入力強度に応じて出力パルス波形の周波数が変化する。

本論文は8章から構成される。以下に、各章の要約した内容を示す。

第1章では、本研究の背景、動物の神経細胞、動物の運動、神経系の工学的模倣とロボットへの搭載についての先行研究、および本研究の目的と構成について述べている。

第2章では、パルス形ハードウェアニューロンモデルである細胞体モデルとシナプスモデルの回路構成と基本的な動作について述べている。

第3章では、パルス形ハードウェアニューロンモデルで構成した神経回路モデルを搭載する昆虫型マイクロロボットおよび、自発的に歩容を生成する四足歩行ロボットの構成と動作について述べている。昆虫型マイクロロボットはミリメートルサイズの歩行ロボットで、Central Pattern Generator (CPG)モデルの出力に応じて各脚のShape Memory Alloy (SMA)アクチュエータが収縮することで昆虫のような歩容で歩行する。

さらに CPG モデル内の興奮抑制シナプスモデルの荷重電圧を変更することで、異なる歩容を生成する。自発的に歩容を生成する四足歩行ロボットは、細胞体モデルと抑制性シナプスモデルで構成したニューロモルフィック回路により各足を独立して制御するロボットで、足先の圧力センサへの入力により対応する足の速度が変化する。四足歩行ロボットは各足が圧力に応じて速度が変化することで、四足歩行動物のような歩容を自発的に生成して歩行し、さらに足の基準速度に応じた異なる歩容を生成する。

第 4 章では、受容細胞モデルの回路構成と動作について述べている。受容細胞モデルは細胞体モデルを基に設計した発振回路で、搭載するセンサへの入力によりパルス波形を出力する。さらに、搭載するセンサへの入力の強度に応じて発振周波数が変化する。回路シミュレーションおよび実装回路の測定より、受容細胞モデルの発振特性について明らかにしている。さらに、圧力センサと CdS セルを搭載した受容細胞モデルの測定より、受容細胞モデルはセンサに刺激を入力することで発振し、センサへの入力刺激が大きくなるほど受容細胞モデルの発振周波数が高くなる特性を明らかにしている。

第 5 章では、昆虫型マイクロロボットへの搭載を目的とした集積回路化した受容細胞モデルの開発と、昆虫型マイクロロボット用 CPG モデルへの受容細胞モデルの搭載について述べている。集積回路化した受容細胞モデルは第 4 章で示した受容細胞モデルの抵抗器を MOSFET に変更することで構成した。回路シミュレーションと実装した IC チップの測定より、集積回路化した受容細胞モデルの特性を明らかにしている。また、Photovoltaic (PV)セルを搭載した受容細胞モデルの測定を行い、照度に対する発振周波数の特性を明らかにしている。さらに、PV セルを搭載した受容細胞モデルを昆虫型マイクロロボット用 CPG モデルに搭載し、回路動作を測定した。受容細胞モデルを搭載した昆虫型マイクロロボット用 CPG モデルは、受容細胞モデルと積分回路により PV セルへの照度に応じて興奮抑制シナプスモデルの荷重電圧が変化し、CPG モデルが生成する歩容が変化する。測定の結果、受容細胞モデルを搭載した CPG モデルは PV セルへの照度に応じて生成する歩容が変化するを明らかにしている。

第 6 章では、ディスクリット素子で実装した受容細胞モデルをニューロモルフィック回路に搭載した、受容細胞モデル一体型ニューロモルフィック回路の構成と動作、四足歩行ロボットへの実装について述べている。受容細胞モデル一体型ニューロモルフィック回路は、第 2 章で説明したニューロモルフィック回路に受容細胞モデルと積分回路を搭載することで、マイクロコントローラを介さずに圧力センサへの荷重に応じて発振周波数が変化する回路である。回路シミュレーションと実装回路の測定より、受容細胞モデルの発振周波数に応じてニューロモルフィック回路内の細胞体モデルの発振周波数が変化するを明らかにしている。また、受容細胞モデル一体型ニューロモルフィック回路を搭載した四足歩行ロボットの歩行実験の結果、四足歩行ロボットが動物のような歩容を自発的に生成し歩行することを明らかにしている。

第 7 章では、デジタル制御を介さずに歩行可能なラット型ロボットと、ラット型ロボット駆動用の CPG モデルについて述べる。ラット型ロボットはラットの筋骨格を参考に構成し、SMA アクチュエータにより駆動する歩行ロボットである。SMA アクチュエータはデジタル制御を介さずにリニアに駆動するアクチュエータであり、ラット型ロボットに搭載することで筋肉のように脚部を駆動する。ラット型ロボット駆動用の CPG モデルはラット型ロボットの 1 つの脚部を駆動するパターン波形を生成する回路である。さらに CPG モデルは生体の神経回路のメカニズムを参考に、各脚部への荷重に応じて伸筋に対応する SMA アクチュエータの収縮を維持し、脚部の駆動周期を延長する機能を持つ。回路シミュレーションより、ラット型ロボット駆動用 CPG モデルはラット型ロボットの脚部を駆動するために必要な波形パターンを生成することを明らかにしている。さらに、受容細胞モデルの発振により伸筋に対応する SMA アクチュエータを駆動する細胞体モデルの発振を維持し、脚部の駆動周期を延長することを明らかにしている。

第 8 章では、本研究で得られた成果をまとめている。

以上が各章の要約であり、本論文では以下の主要な結論を得た。

本論文では、受容細胞の機能を模倣した受容細胞モデルを開発し、回路シミュレーションおよび実装回路の測定より、センサへの入力に応じて発振特性が変化するを明らかにした。また、受容細胞モデルを昆虫型マイクロロボット用 CPG モデルや自発的に歩容を生成する四足歩行ロボットのニューロモルフィック回路へ搭載し、歩容の切り替えや生成が可能であることを明らかにした。さらに、ラット型ロボットへの受容細胞モデルの実装に向けた CPG モデルを提案し、回路シミュレーションより有効性を明らかにした。