

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 齊 藤 健

（副査） 教授 内木場 文 男                      教授 羽多野 正 俊

教授 佐 伯 勝 敏

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コロナなどの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、タイヤ型ロボットが苦手とする不整地でスムーズに移動が可能である。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が研究・開発されている。しかし、未だ動物の自律行動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歩行ロボットへ実装する為に、動物の神経回路を模倣した制御システムを開発し歩行ロボットへ実装する研究がある。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果的な歩容に切り替えるなどの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。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を実現する研究が行われている。神経回路を模倣する研究は主に形式ニューロンモデルを使用する。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、生体の神経回路のスパイクによる情報伝達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。

申請者森下克幸が所属する研究室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。

以上の背景より、申請者は自律的に行動することが可能なロボットの実現に向けて、ハードウェアによる受容細胞モデルを開発して歩行ロボットへの実装に関する研究を行い、その成果を申請論文にまとめた。申請論文は機械工学、電気・電子工学、情報工学の分野において技術的な水準が高いと評価できる。以下に論文の章立てに沿って、論文の審査の内容を報告する。

「第1章 序論」では、研究背景および論文の目的や構成がわかりやすく説明されている。特に、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搭載した先行研究について述べることで研究の課題を明確に浮き上がらせ、申請論文の重要性が明確にされている。

「第2章 パルス形ハードウェアニューロンモデル」では、歩行ロボットに実装するパルス形ハードウェアニューロンモデルの構成要素である、細胞体モデルおよびシナプスモデルの基本的な動作原理について述べている。本研究で開発した受容細胞モデルもパルス形ハードウェアニューロンモデルを基にしている。研究に用いたパルス形ハードウェアニューロンモデルが簡潔に説明され、かつ他の研究者が提案しているニューロンモデルとの比較もしている。

「第3章 パルス形ハードウェアニューロンモデルを実装した歩行ロボット」では、申請者の所属する研究室の既存の研究をまとめ、パルス形ハードウェアニューロンモデルを実装した歩行ロボットについて述べている。第3章により、既存の研究と申請論文の研究との違いが明確に理解できる。

第4章以降が申請者の研究成果である。

「第4章 受容細胞モデル」では、第5章、第6章および第7章の歩行ロボットに必要な、受容細胞モデルについて述べている。はじめに受容細胞のシミュレーション結果を示し、次にディスクリート素子を用いて受容細胞モデルを実際に作製し、実測結果を報告している。また、圧力センサや光センサを接続した場合の結果も併せて報告しているため、提案したモデルの特性が明らかになっている。

「第5章 受容細胞モデルの集積回路化とマイクロロボット用 CPG モデルへの搭載」では、昆虫型マイクロロボットへの搭載のための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 Central Pattern Generator (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。マイクロロボットにはディスクリート素子では搭載が困難であるため、まず、受容細胞モデルの集積回路化について検討している。回路構成やシミュレーション結果を報告し、実際に作製した集積回路の測定結果についても報告している。また、集積回路技術を用いて作製した Photovoltaic (PV)セルを用いて、マイクロロボットの歩容が切り替え可能なことを明らかにしている。シミュレーションにとどまらず、実際に集積回路を作製しており、時間をかけて丁寧に研究を実施していることが想像できる。

「第6章 受容細胞モデル一体型ニューロモルフィック回路」では、ディスクリー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。回路シミュレーションとディスクリート素子で実装した回路基板の測定結果より、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こと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四足歩行ロボットに搭載し歩行実験を行った結果、四足歩行ロボットは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。四足歩行ロボットの歩行実験では先行研究と比較してより円滑に動作している点も評価できる。

「第7章 筋骨格を模倣するラット型ロボット駆動用の CPG モデルの開発」では、デジタル制御を搭載せ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ている。ラット型ロボットはアクチュエータをサーボモータから Shape Memory Alloys (SMA)アクチュエータに変更することで、デジタル制御を介さずにアクチュエータを駆動することが可能であり、また動物の筋肉のようにリニアな駆動を模倣する歩行ロボットである。申請者が開発した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つの脚部の駆動するパターン波形を生成する回路で、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することで、脚部の駆動周期を変化する。回路シミュレーションの結果、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。本章の結果より、申請者が提案した受容細胞モデルを歩行ロボットに実装することで、既存の歩行ロボットと比較して生物により近いロボットが実現可能である。

「第8章 結論」では、申請者が本研究で得た成果をまとめている。第1章で述べた課題に対して十分な成果が得られたことを明確に結論づけている。

申請論文では、受容細胞の機能を模倣した受容細胞モデルを開発し、シミュレーション結果および実装した回路の測定結果より、受容細胞モデルはセンサへの入力に応じて発振特性が変化することを明らかにしている。また、受容細胞モデルを昆虫型マイクロロボット用の 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に実装している。シミュレーションおよび実装回

路の測定結果より、歩行ロボットは受容細胞モデルを用いて歩容の切り替えや生成が可能であることを明らかにしている。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て新たに駆動用の CPG モデルを提案し、回路シミュレーションにより有効性を明らかにしている。本研究の成果は、自律的に行動することが可能なロボットの実現に向けて、従来にない次世代型のロボット制御の研究成果として高く評価できる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月15日