

論文審査の結果の要旨

氏名：武井裕樹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：パルス形ハードウェアニューロンモデルを用いた四足歩行ロボットシステムに関する研究

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

現在のロボットの制御方法では、ロボットがおかれる状況を想定し、それに対して行動するアルゴリズムを予めプログラムする。しかし、無数の状況に対応可能なアルゴリズムや、それをリアルタイムに処理する能力を有するコンピュータはなく、自律的に行動することが可能なロボットは実現されていない。ロボットが移動計画からアクチュエータの制御までの全てをコンピュータによって計算している一方で、動物は、歩行などの定型的な運動を脊髄のニューラルネットワークによって無意識下で生成していることが示されている。歩行は、ロボットと動物に共通する最も基本的な動作のひとつであり、動物が足並み(歩容)を生成する原理を利用することで、動物のような柔軟な状況への対応力をもつロボットが実現できる可能性がある。動物が種によって生態や身体構造が異なるにも関わらず同様の歩容であることから、歩容の生成には普遍的な原理が存在していると考えられるが、その原理は明らかにされていない。

以上の背景より、申請者武井裕樹は、自律的に行動することが可能なロボットの実現に向けた、パルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて歩容を生成する四足歩行ロボットシステムの開発に関する研究を行い、その成果を申請論文にまとめた。まず、第1章では研究背景を述べ、第2章では、パルス形ハードウェアニューロンモデルについて述べている。第3章以降が武井裕樹の研究成果であり、第3章では、第4章の四足歩行ロボットシステムに実装した、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルについて述べている。第4章では、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて歩容を生成する四足歩行ロボットシステムについて述べている。第5章、第6章は、第4章の四足歩行ロボットシステムの実験結果を基に行った研究について述べている。第5章では、四足歩行ロボットシステムに搭載した自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの回路間に生じていた特性のばらつきを低減するために開発した、集積回路(IC)について述べている。第6章では、第4章で述べた四足歩行ロボットシステムの機体の設計データを動力学シミュレータに取り込み、四足歩行ロボットシステムと同様に動作するモデルを用いたシミュレーションについて述べている。

以上より、申請論文は四足歩行ロボットシステムを構築し、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、ニューロンモデル、四足歩行動物の歩行運動、四足歩行動物の歩容を工学的に模倣した先行研究について述べる事で研究の課題を明確に浮き上がらせており、申請論文の重要性が明確にされている点で評価できる。

「第2章 パルス形ハードウェアニューロンモデル(P-HNM)」では、四足歩行ロボットシステムに用いた、自己抑制をもつ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抑制性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。研究に用いた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抑制性シナプスモデルが適切に説明されている点が評価できる。

「第3章 ディスクリット素子による自己抑制をもつP-HNM」では、四足歩行ロボットシステムに用いた、ディスクリット素子によって構築した自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルについて述べている。四足歩行ロボットシステムに用いるための、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの主な要件として、電圧入力によるフィードバックに応じてパルスを出力する周期(パルス周期)が長くなる必要がある。この要件を満たすため、細胞体モデルの出力を抑制性シナプスモデ

ルによって、同じ細胞体モデルに入力(自己抑制)する、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを設計している。また、回路基板に実装した自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの、四足歩行ロボットシステムに用いる上で重要な特性の測定結果を示している。四足歩行ロボットシステムへの搭載に向け、回路に必要な要件を満たすようにディスクリート素子を組み合わせることで実際の回路基板を作製しているため高く評価できる。

「第4章 自己抑制をもつP-HNMを用いて歩容を生成する四足歩行ロボットシステム」では、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて歩容を生成する四足歩行ロボットシステムの機械構成要素と、電気構成要素、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いた関節の制御について述べている。4枚の自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを実装した回路基板を用いて、各脚の関節を個別に制御する手法の四足歩行ロボットへの実装を行っている。また、四足歩行ロボットシステムを歩行させる実験により、四足歩行ロボットシステムが、低速で歩行させた場合はWalk、高速で歩行させた場合はTrotの歩容を生成することを明らかにしている。シミュレーション結果のみの論文が多く発表されているが、実際に四足歩行ロボットシステムを実現している点が高く評価できる。

「第5章 集積回路(IC)による自己抑制をもつP-HNM」では、四足歩行ロボットシステムにおいて電氣的な外乱要素であった、回路基板に実装した自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの回路基板間に生じていた特性のばらつきを低減を検討している。四足歩行ロボットシステムに必要な4回路の、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを実装したICチップを設計し、製造したICチップの測定の結果を示している。四足歩行ロボットシステムに実装していた回路基板の測定結果とICチップの測定結果の比較より、1枚のICチップに実装した、4回路の自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルは、回路間の特性のばらつきが小さいことを示している。また、ICチップに実装した自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの回路定数を変更することにより、回路間のばらつきをさらに低減可能であることを示している。電氣的な外乱要素を集積回路化することで効果的に低減している点が評価できる。

「第6章 歩容を生成する四足歩行ロボットモデルの動力学シミュレーション」では、四足歩行ロボットシステムを動力学シミュレータ上にモデル化し、機械的な外乱要素を排除した理想的な空間において、その四足歩行ロボットモデルの動作について述べている。四足歩行ロボットモデルの設計には、第4章の四足歩行ロボットシステムの機体の設計データを用いており、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルの機能を数式で代替した脚の制御手法を実装している。シミュレーションの結果、四足歩行ロボットモデルがWalk、Trotの歩容を生成し、長期間に渡って維持することを明らかにしている。4章で作製した四足歩行ロボットシステムが歩容を維持した期間は短かったが、機械的な外乱要素を排除した理想空間において安定的に歩容を維持することを明らかにしているため、実験結果とシミュレーション結果の比較検討により本論文の再現性を高めている。

「第7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、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いた方法論により、四足歩行ロボットシステムが四足歩行動物の歩容を生成することを明らかにしている。また、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルをICチップに実装することで大幅に回路間の特性のばらつきを低減可能であり、四足歩行ロボットシステムにおける電氣的な外乱の低減が期待できることも示している。さらに、自己抑制をもつパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いた方法論に基づいた動力学シミュレーションにより、四足歩行ロボットモデルが四足歩行動物の歩容を生成し、歩容を長期間維持することを明らかにしている。本研究の成果は、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4年2月17日