

論文の内容の要旨

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

現行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。生理学的な実験は、動物の歩容の生成にニューラルネットワークが深く関わっていることを示唆している。しかし、複雑な構造のニューラルネットワークの機能は解析が困難であり、ニューラルネットワークと歩容の関係の多くは明らかにされていない。工学的にニューロンを模倣したモデルを用いることで、動物のニューラルネットワークの機能を再現できる可能性があり、様々なニューロンモデルが提案されている。これまでに提案されたニューロンモデルの中でも、特に、パルス形ハードウェアニューロンモデルは、モデル化の忠実度の高さと応答の早さからロボットの制御に有利であり、自律的に行動することが可能なロボットの実現が期待できる。パルス形ハードウェアニューロンモデルによって構築した人工ニューラルネットワークを利用することで、歩容を生成できることが示されている。しかし、パルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて、動物のように身体と感覚入力の相互作用を利用することによる、歩容を生成する方法論は確立されていない。感覚入力を利用する制御システムをもたない歩行機械を用いた研究は、歩行機械を坂の上に置くと、重力によって生じる身体と環境の相互作用を利用して歩容を生成することを明らかにした。身体と感覚入力を利用して歩容を生成する方法論としては、位相振動子と脚先の圧力のフィードバックを用いた四足歩行ロボットシステムが提案されている。この四足歩行ロボットシステムは、ロボットの脚を、結合していない4つの位相振動子の位相によって個別に制御するだけで、平坦な床において歩容を生成することが可能であることが示されている。しかし、圧力フィードバックは位相振動子を加減速し、圧力フィードバックの強度が位相振動子の位相に応じて変化するため、この方法論は複雑であり、歩容の生成に必要な本質的な要素は明らかにされていない。以上のように、歩容を生成する様々な方法論が提案されているが、その原理は未だ不明である。

本論文は、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、その成果をまとめたものである。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章以下が筆者の研究成果であり、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もと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。

本論文の各章の内容を以下に要約する。

第1章では、本研究の背景、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、本論文の目的と構成を説明する。

第2章では、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、細胞体モデルと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。

第3章では、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。

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。一方で、四足歩行ロボットシステムが歩容を維持した期間は短く、この原因として考えられる電氣的な外乱要素と機械的な外乱要素について、以降の第5章、第6章で検討している。

第5章では、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。

第6章では、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。

第7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、次のような主要な結論を得た。

本論文では、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た。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を示した。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た。