

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

令和 4年 1月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

精密機械工学専攻

武 井 裕 樹

目次

第 1 章 序論	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 ニューロンモデル.....	3
1-3 四足歩行動物の歩行運動.....	4
1-4 四足歩行動物の歩容の工学的模倣.....	7
1-4-1 CPG モデルによる歩容の生成.....	7
1-4-2 受動歩行.....	8
1-4-3 位相振動子を用いた歩容の生成.....	10
1-5 本論文の目的.....	12
1-6 本論文の構成.....	14
第 2 章 パルス形ハードウェアニューロンモデル(P-HNM).....	17
2-1 細胞体モデル.....	17
2-2 抑制性シナプスモデル.....	19
第 3 章 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM	20
3-1 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の設計.....	20
3-2 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の測定結果.....	25
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	30
4-1 機械構成要素.....	31
4-2 電気構成要素.....	33
4-3 四足歩行ロボットシステムの関節の制御.....	36
4-4 四足歩行ロボットシステムによる歩容の生成.....	39
第 5 章 集積回路(IC)による自己抑制をもつ P-HNM.....	43
5-1 IC による自己抑制をもつ P-HNM の設計.....	43

5-2 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の測定結果	49
5-3 回路定数を変更した IC による自己抑制をもつ P-HNM の設計	53
5-4 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の測定結果(回路定数変更後)	58
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	60
6-1 四足歩行ロボットモデルの設計	60
6-2 四足歩行ロボットモデルの関節の制御.....	65
6-3 四足歩行ロボットモデルによる歩容の生成.....	68
第 7 章 結論	72
謝辞	74
参考文献	75
研究業績一覧	80

第1章 序論

1-1 研究背景

コンピュータの性能が向上したことで、複雑なアルゴリズムのリアルタイムな処理が可能になった。従来は制御が難しいとされてきた移動ロボットにおいても、高い運動能力をもたせることが可能になっている。さらに、歩行制御理論の進展により、不安定な足場においても安定的に歩行が可能な頑健性を有するロボットも開発された[1]。近年では、レーザ距離センサやGPSセンサなどを利用して経路計画を行い、障害物を回避しつつ入力された目標地点に向かうことも可能になり、すでに多くの用途で活用されている[1-3]。しかし、動物と同等の運動能力は実現されているものの、動物のように自律的に行動できるものは存在しない。その原因の1つとして、現在の一般的なロボットの制御手法では、無数に想定される状況への自律的な対応が困難なことが挙げられる。現在のロボット制御では、起こりうる状況を想定し、取るべき行動をあらかじめアルゴリズムに組み込む手法が主流である。この手法は、産業ロボットのような、同じ動作を正確に何度も繰り返す用途には適しているが、起こりうる全ての状況に対する行動をプログラムする必要があるため、柔軟に事態に対応することは難しい。

現在のノイマン型コンピュータは、単純な数値計算の早さでは人間をも凌駕しているが、逐次処理である性質上、自律的な行動を可能にするほどの大量の情報のリアルタイムな処理は、スーパーコンピュータですら実現されていない。マウス規模の250万個のニューロンからなる脳をシミュレートするためにはマウスの4万倍(400ワット)の電力が必要でありながらも実際のマウスの脳より9千倍遅く、人間の脳規模になるとエクサスケールのスーパーコンピュータと5億ワットもの電力が必要になるという試算もされている[4]。一方で、神経科学の発展に伴い、動物の脳のニューラルネットワーク(神経回路網)を模倣した情報処理手法が研究されている

[5-10]. ニューラルネットワークを構成するニューロン(神経細胞)の特性は明らかにされつつあるが、複雑な構造のニューラルネットワークの情報処理原理は未だ不明な点が多く、ニューロンの機能を模倣したニューロンモデルを用いた解析が行われている[11-14]. これまでに様々なニューロンモデルが提案され、ニューロンやニューラルネットワークの機能の解析に用いられている. ニューロンモデルを用いて脳の学習アルゴリズムやネットワークの構造を模倣した、深層学習などの技術は、画像認識などの用途において実用的な機能を発揮することを示した[10]. ニューラルネットワークを模倣した情報処理手法は、学習のみならず、動物のような柔軟な運動の生成にも期待されているが、その方法論はまだ確立されていない.

1-2 ニューロンモデル

これまでに提案されてきたニューロンモデルは、ニューロンの数式によって模倣した数式モデルと、電子回路で模倣したハードウェアモデルがある[11-14]。それらのニューロンモデルは、ニューロンの機能を極めて単純に模倣するアナログモデルやデジタルモデル、非線形な振る舞いを高い忠実度で模倣するパルス形モデルに大別できる。数理的なニューロンモデルは、ノイズの無い理想的な環境で実験することが可能な利点がある。また、比較的簡単に、多数のモデルを使用した大規模なネットワークを構築することが可能であり、現在の深層学習などでよく用いられている[6, 10]。しかし、前述のように、大規模なネットワークのシミュレーションには膨大なコストがかかる。一方で、ハードウェアモデルでは、高い非線形性をもつモデルであっても高速に計算されることから、モデル化の忠実度が高いパルス形モデルと相性がよく、高度な機能の実現が期待できる[15, 16]。また、大規模なネットワークを構築した際にも応答が早く得られるため、リアルタイム性が重要なロボットの制御への利用に有効である。現状では、ニューロンモデルをロボットの運動の生成に利用するための方法論が確立されていないため、忠実度の高いモデルを用いる必要がある。したがって、本論文では、四足歩行ロボットシステムにパルス形ハードウェアニューロンモデル(Pulse-Type Hardware Neuron Model : P-HNM と略記)を実装した。

1-3 四足歩行動物の歩行運動

動物は、多数の自由度をもちながらも、脳や全身のニューラルネットワークにより、自律的に行動することが可能である。生理学の研究により、動物は、呼吸や咀嚼、歩行のような定型的な運動を脊髄の中樞パターン生成器(Central Pattern Generator:CPG と略記)などのニューラルネットワークと感覚入力の相互作用によって生成することが示されている[17-21]。歩行運動は、動物と歩行ロボットに共通する最も重要な動作の一つであり、歩行時の運動学や、ニューラルネットワークの活動の多様な実験が行われてきた[22-25]。四足歩行動物の運動学の研究では、状況に応じて歩容と呼ばれる足並みを切り替えながら移動することが報告されている[22-24]。特に、歩容ごとに最適な移動速度が存在し、歩容を切り替えることで効率的に移動する結果を示した、ウマを用いた実験が有名である[22]。四足歩行動物は、多くの種で歩容が共通して低速では Walk, 中程度の速さでは Trot, 高速では Gallop の歩容で移動する。これらの歩容は、脚間の位相差に図 1-1 に示すような特徴がある。同図は、1 周期の脚の運動における、左前脚を基準とした他の脚との位相差を示している。Walk では、各脚を順に 90° の位相差で動作する。Trot では、対角に位置する脚を 1 対として、それぞれの対を 180° の位相差で動作する。Gallop では、全ての脚が地面と接しない期間が存在する、各脚の位相差が均等でない足並みとなる。各歩容における各脚を接地するタイミングは、図 1-2 に示す特徴がある。同図では、1 周期の脚の運動において、脚を接地している間である立脚期と、接地していない間である遊脚期を着色の有無で示している。生態や身体構造が異なる種においても同様の歩容であることから、種を超えた普遍的な原理が存在することが考えられる。しかし、歩容を生成する原理や、ニューラルネットワークの働きに関して現在でも議論されているものの、その多くは未だ不明である[26, 27]。

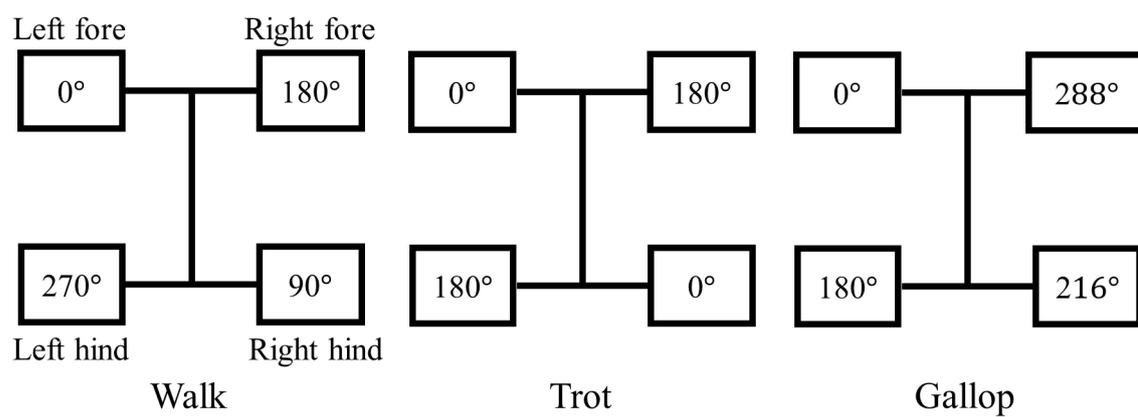


図 1-1 四足歩行動物の代表的な歩容における脚間の位相差
 ([24]をもとに作成)

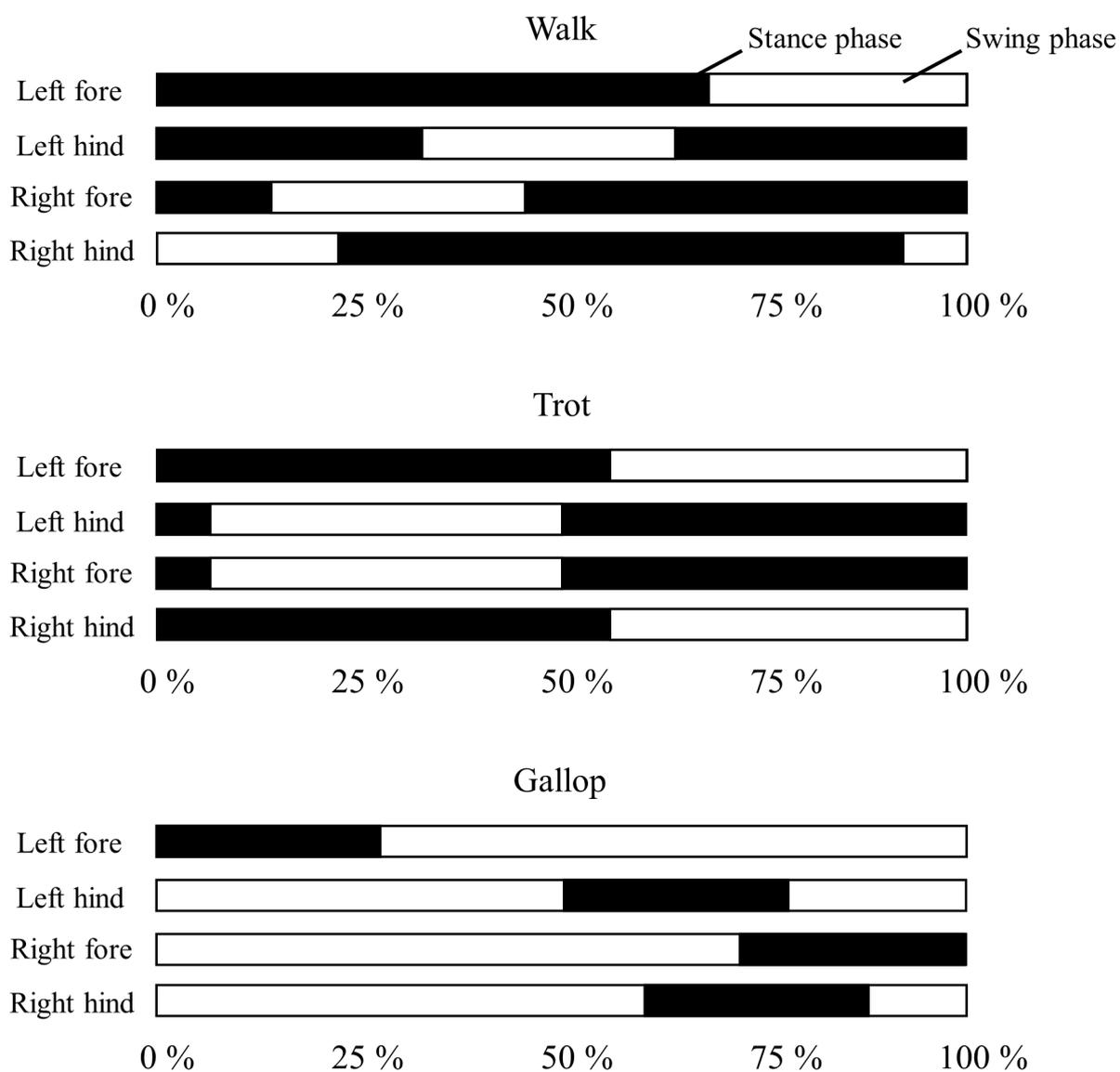


図 1-2 四足歩行動物の代表的な歩容における各足の接地タイミング
 ([24, 25]をもとに作成)

1-4 四足歩行動物の歩容の工学的模倣

生理学的な研究は、特定の機能を実現しているネットワークに限定して活動を解析することが難しく、その一方で、構成論的手法によって、工学的に歩容を生成する原理が推測されている。本節では、本論文と特に関係が深い、CPGモデルと、受動歩行、位相振動子による歩容の生成について説明する。

1-4-1 CPGモデルによる歩容の生成

複数のニューロンモデルを結合することによって構築したCPGモデルの研究では、CPGを構成する各ニューロンの発振の位相差を四足歩行ロボットの各脚の運動の位相差(歩容)として用いる手法が提案されている[28-37]。CPGモデルの動作はリミットサイクルの特性をもち、センサによる感覚入力無くとも一定のリズムを出力するため、安定的にロボットの歩容を生成することが可能である。一方で、状況に応じて行動を変更するためには不可欠な感覚入力をCPGモデルの出力の調節に取り入れた方法論によって、歩行の早さに応じた歩容の調整や、不整地における安定的な歩行が可能であることが報告されている[28-34]。CPGモデルや、CPGモデルと感覚入力によってロボットを制御する方法論は、高次のコントローラが計算する必要があった、歩容を生成するために必要な多次元の制御信号を単純化することが可能である。

CPGモデルを構築する際は、それぞれのニューロンモデルが他のニューロンモデルに与える影響を定義することで、ニューロンモデル間の位相関係を設計する。すなわち、脚間の相互作用を予め設計する必要がある。しかし、動物のCPGの構造や、脚間の相互作用は明らかにされておらず、CPGモデルを設計する方法論は確立されていない。

1-4-2 受動歩行

受動歩行は、図 1-3 に示すような、受動的に動作する関節をもつ歩行機械による歩行を指す[38]。歩行機械は能動的に動力を生成するアクチュエータをもたないが、坂の上に置くことで、重力によって身体の構造と環境との相互作用を利用して歩容を生成することが可能である。歩行機械は、各脚が胴体によって接続されていることで、脚間の相互作用には制限があるが、制御はされない。

図 1-3 に示した二対の脚による歩行機械だけでなく、四足の歩行機械も同様に歩容を生成することが明らかにされている[39-42]。四足の歩行機械は、坂の傾斜角度や脚の長さなどの機械的性質に応じて、いくつかの四足歩行動物の歩容を生成する。歩行機械が歩容を生成し、維持することは、歩行機械に力学的な安定点が存在していることを示唆している。歩行機械が坂を下る際に歩容を生成するため、平坦な床における歩容の生成に適用が可能とは限らないが、長い時間をかけて動物が進化する中で獲得したものと同様の歩容を生成できることは、受動歩行が歩容生成の原理に近いことを示唆している可能性がある。

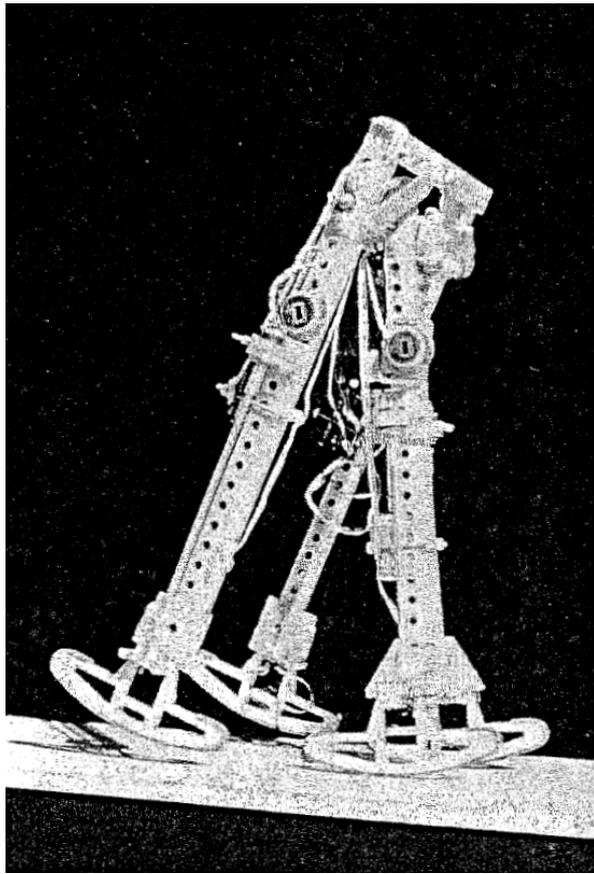


図 1-3 受動歩行機械([38]より引用)

1-4-3 位相振動子を用いた歩容の生成

各脚の位相を数式による位相振動子の位相と連動させて制御する四足歩行ロボットシステムを用いた実験では、四足歩行ロボットシステムが移動速度に応じて四足歩行動物の歩容を生成することが報告されている[43, 44]. 四足歩行ロボットシステムの各脚には、図 1-4 に示すように、位相振動子[45, 46]によって制御された DC モータを使用した関節が配置されている. それぞれの脚の先端には圧力センサが取り付けられており、各位相振動子に個別にフィードバックする. 脚を制御する位相振動子は式(1-1)で表される.

$$\dot{\phi}_i = \omega + \sigma N_i \cos\phi_i \quad (1-1)$$

ここで、 ϕ は振動子の位相、 N は脚先の圧力を表す. したがって、左辺は振動子の角速度を表す. ω は角速度であり、これを変化させることで歩行の早さを変化させることが可能である. また、 σ はフィードバックゲインを表す定数である. 下付き文字の i は i 番目の脚を意味しており、この四足歩行ロボットシステムにおいては、 i は 1 から 4 であり、それぞれ、右前、右後ろ、左前、左後ろの脚における変数を表す. 式(1-1)が示すように、4 つの位相振動子は結合されていないが、それぞれの脚が胴体によって物理的に接続されることで、 N_i は異なる値をとり、振動が加減速される. N_i の差は振動の早さに影響を与え、その結果、各脚の動作の位相差(歩容)を生成する. 式(1-1)の右辺は、 N が 0 の(脚が接地していない)場合、 ω となる. この位相振動子には右辺 = 0 の安定点が存在し、右辺第二項の ϕ によってフィードバックの強さと、振動の加速、減速が切り替わることで安定点に向かって制御される.

この位相振動子を利用する方法論は、平坦な床において、動物のように身体と環境の相互作用を利用して歩容を生成する方法論のひとつとして有

効であると考え、本論文で示す四足歩行ロボットシステムの歩容を生成する方法論に応用した。

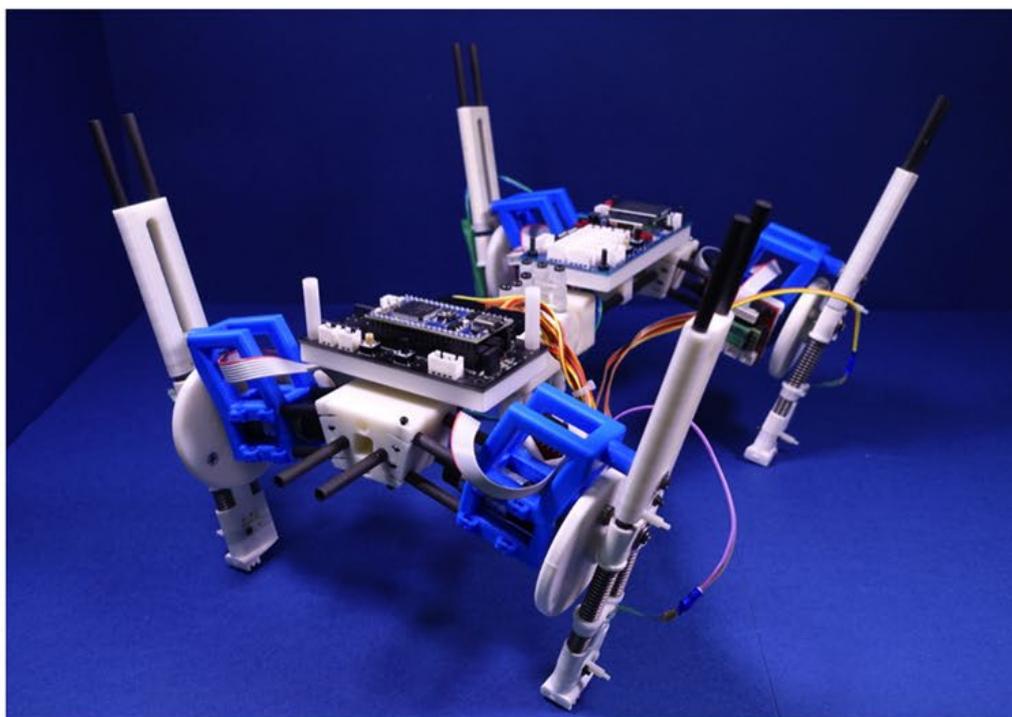


図 1-4 位相振動子によって歩容を生成する四足歩行ロボットシステムの
外観([44]をもとに作成)

1-5 本論文の目的

現代のロボットの制御方法は、あらかじめロボットがおかれる状況を想定し、状況ごとにアルゴリズムをプログラムしておく必要がある。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。コンピュータの性能が向上するに伴って、今後もロボットが対応可能な状況を拡張することが可能であると予想できるが、動物のもつ柔軟な状況への対応能力とは大きな開きがある。

ロボットは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が、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。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)を生成する原理を模倣することで、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、動物がニューラルネットワークにより、身体と感覚入力の相互作用を利用して歩容を生成す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、その機能が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る。これまでに提案されてき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を用いて CPG を構築することに

よって歩容を生成できることが示されているが，パルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて身体と感覚入力の相互作用を利用して歩容を生成する方法論は確立されていない．

歩行機械を用いた研究では，歩行機械は感覚入力による制御システムをもたないが，坂を下ることで身体と環境の相互作用を利用して歩容を生成することが示された．歩行機械が歩容を生成し，維持することは，歩行機械に力学的な安定点が存在していることを示唆している．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，平坦な床において歩容を生成することが可能であったが，歩行機械とは異なり，4つの位相振動子それぞれに安定点が定義されていることで複雑化しており，歩容を生成する原理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．筆者は，ニューロンの非線形な振る舞いを高い忠実度で模倣するパルス形ハードウェアニューロンモデルを用いて身体と感覚入力の相互作用を利用することによって歩容を生成する方法論を開発することで，動物が歩容を生成する原理に迫り，自律的に行動することが可能なロボットの実現に近づくと考えた．そこで，本論文では，P-HNMを用いて歩容を生成する方法論の一つとして開発した，P-HNMに脚先の圧力を個別にフィードバックすることによって脚を駆動する四足歩行ロボットシステムについて述べる．また，四足歩行ロボットシステムに用いたP-HNMを集積回路に実装することによる，回路の特性の改善について述べる．さらに，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，そのモデルの動作について述べる．

1-6 本論文の構成

図 1-5 に本論文のフローチャートを示す。第 1 章では研究背景を述べ、第 2 章では、P-HNM について説明する。第 3 章以下が筆者の研究成果であり、第 3 章では、自己抑制をもつ P-HNM の基本的な特性について述べる。第 4 章では、第 3 章で述べた 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について述べる。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した研究について述べる。第 5 章では、第 3 章で述べた P-HNM の回路間の特性のばらつきを低減するために開発した集積回路(Integrated Circuit : IC と略記)について述べる。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る。最後に、第 7 章では、本研究で得られた結果をもとに結論を述べる。

本論文の各章の内容を以下にまとめる。

第 1 章 序論

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、歩容の工学的な模倣を行う先行研究について述べ、本研究の目的と構成を説明する。

第 2 章 パルス形ハードウェアニューロンモデル(P-HNM)

第 3 章で述べる、四足歩行ロボットシステムに用いた自己抑制をもつ P-HNM 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について説明する。

第 3 章 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM

ディスクリート素子によって構築した自己抑制をもつ P-HNM に求められる要件と，回路基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM の基本的な特性について述べる．

第 4 章 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

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の機械構成要素と，電気構成要素，P-HNM を用いた関節の制御方法について述べる．さらに，四足歩行ロボットシステムを歩行させる実験の結果を示す．

第 5 章 集積回路(IC)による自己抑制をもつ P-HNM

第 3 章の P-HNM において発生した回路基板間の特性のばらつきを低減するために開発した IC の設計と，特性の測定結果について述べる．

第 6 章 歩容を生成する四足歩行ロボットシステムの動力学シミュレーション

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構築した四足歩行ロボットモデルの設計と，関節の制御方法について述べる．また，四足歩行ロボットモデルのシミュレーション結果を示す．

第 7 章 結論

本研究で得られた成果をまとめ，結論を述べる．

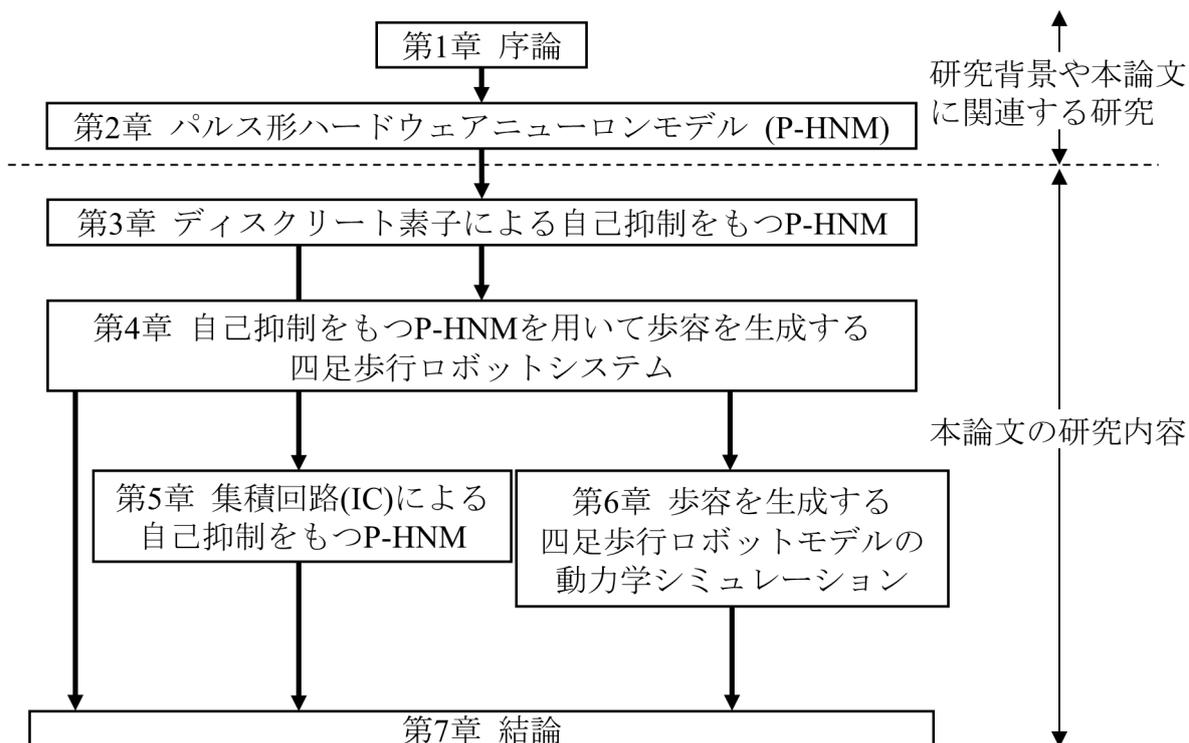


図 1-5 本論文のフローチャート

第2章 パルス形ハードウェアニューロンモデル(P-HNM)

本章では，四足歩行ロボットシステムに実装した，自己抑制をもつ P-HNM の構成要素である，細胞体モデルと抑制性モデルについて説明する．

2-1 細胞体モデル

本細胞体モデルは，生体のニューロンのように相対不応性，出力パルスのアナログ性，および時間的に変化する負性抵抗特性をもつ，電流入力電圧出力の発振回路である．発振モードには，自励振動と他励振動の2通りがあり， V_A に応じて切り替わる．自励振動モードでは，細胞体モデルは細胞体モデルの外部からの入力に依らずに発振する．他励振動モードでは，直流電圧入力あるいは，交流電圧入力によって発振する．

図 2-1 に，細胞体モデルの基本回路図を示す．同図の回路は，電圧制御型負性抵抗回路，等価インダクタ，抵抗 R_1 ， R_2 および，膜容量 C_M から構成されている．電圧制御型負性抵抗回路および等価インダクタは， n チャネル MOSFET M_1 ， p チャネル MOSFET M_2 ，電圧源 V_A ，漏れ抵抗 R_L ，抵抗 R_G および，容量 C_G で構成されている．細胞体モデルの出力 v_{out} のパルス周期とパルス幅は，発振条件を満たす範囲において， V_A ， C_G ， C_M によって任意の出力が得られるように設計することが可能である．図 2-2 に，細胞体モデルの出力の一例(シミュレーション結果)を示す．シミュレーションにおける回路定数は， $C_G = 47 \text{ pF}$ ， $C_M = 10 \text{ pF}$ ， $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ， $R_G = 8.2 \text{ M}\Omega$ ， $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ であり，MOSFET は， M_1 : BSS83， M_2 : BSH205 である．電源電圧は $V_A = 3.5 \text{ V}$ とした．

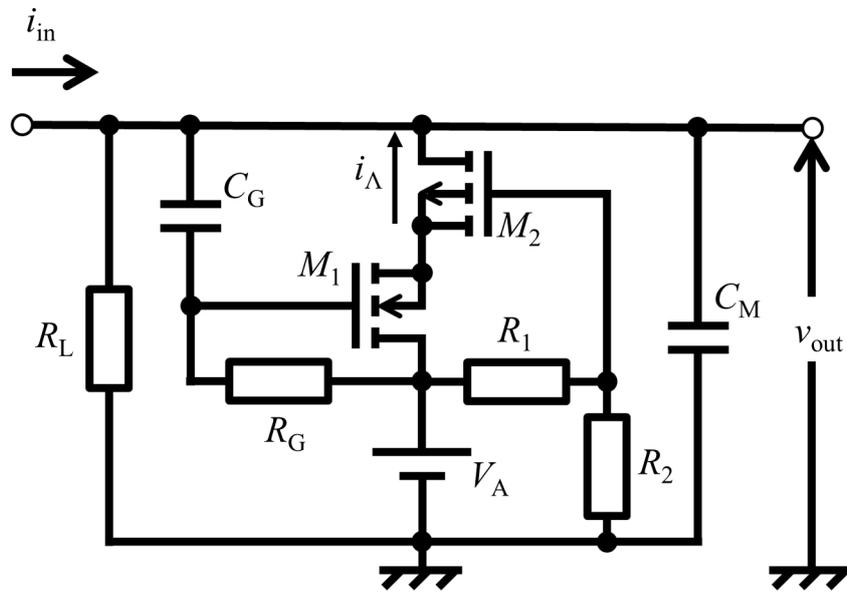


図 2-1 細胞体モデルの基本回路図

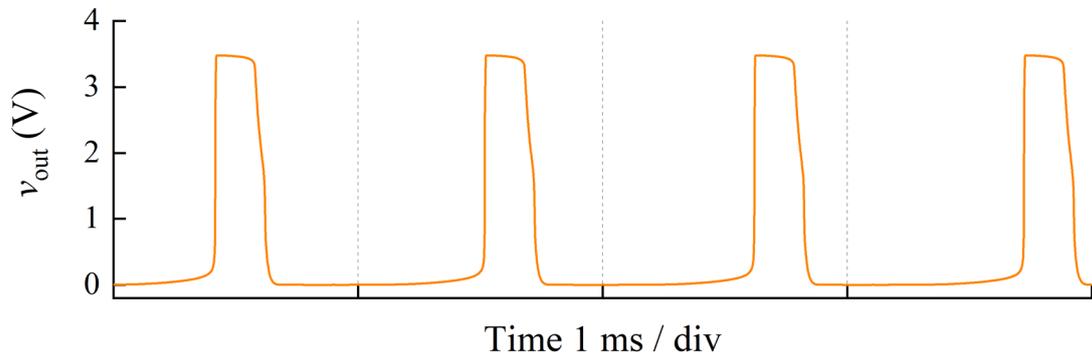


図 2-2 細胞体モデルの出力電圧の一例(シミュレーション結果)

2-2 抑制性シナプスモデル

抑制性シナプスモデルは、電圧入力、電流出力の回路である。 v_{Slin} には、抑制性シナプスモデルに対して入力する細胞体モデルの v_{out} を接続し、 i_{ISout} には、抑制性シナプスモデルから入力を受ける細胞体モデルの v_{out} を接続する。 v_{Slin} に v_{out} を入力する細胞体モデルが発振した際に、抑制性シナプスモデルは、 i_{ISout} を出力する。 i_{ISout} により、抑制性シナプスモデルから入力を受ける細胞体モデルから電流が引き抜かれるため、この細胞体モデルは発振が抑制される。

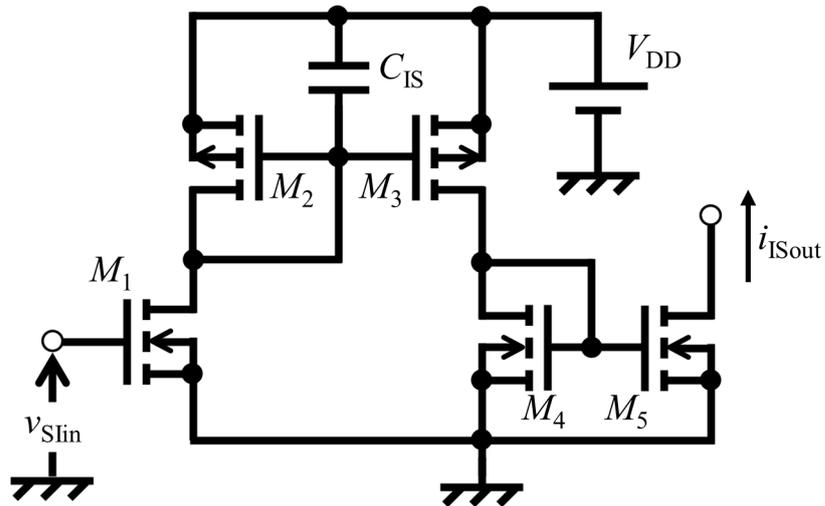


図 2-3 抑制性シナプスモデルの回路図

第3章 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM

第3章以下が筆者の研究成果である。本章では、四足歩行ロボットシステムの歩容の生成に用いた、ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM について述べる。

3-1 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の設計

四足歩行ロボットシステムに用いる自己抑制をもつ P-HNM の要件は以下のとおりである。四足歩行ロボットシステムにおける同回路の役割は第4章で述べる。

1. 電圧入力により、パルスを出力する周期(パルス周期 T)が変化すること
2. T が四足歩行ロボットシステムの関節をリアルタイムに駆動することが可能な長さであること
3. 出力電圧 v_{out} が、ワンボードマイコン Arduino DUE(マイコンと略記)が扱うことが可能な電圧であること

図3-1にディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の回路図を示す。ディスクリート素子による P-HNM の回路定数は、 $C_{Is} = 3.3 \mu\text{F}$, $C_G = 47 \text{ pF}$, $C_M = 10 \text{ pF}$, $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_G = 8.2 \text{ M}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ であり、MOSFET は、 $M_{1, 5, 6, 7, 8}$: BSS83, $M_{2, 3, 4}$: BSH205 である。電源電圧は $V_A = 3.5 \text{ V}$, $V_{DD} = 5.0 \text{ V}$ とした。

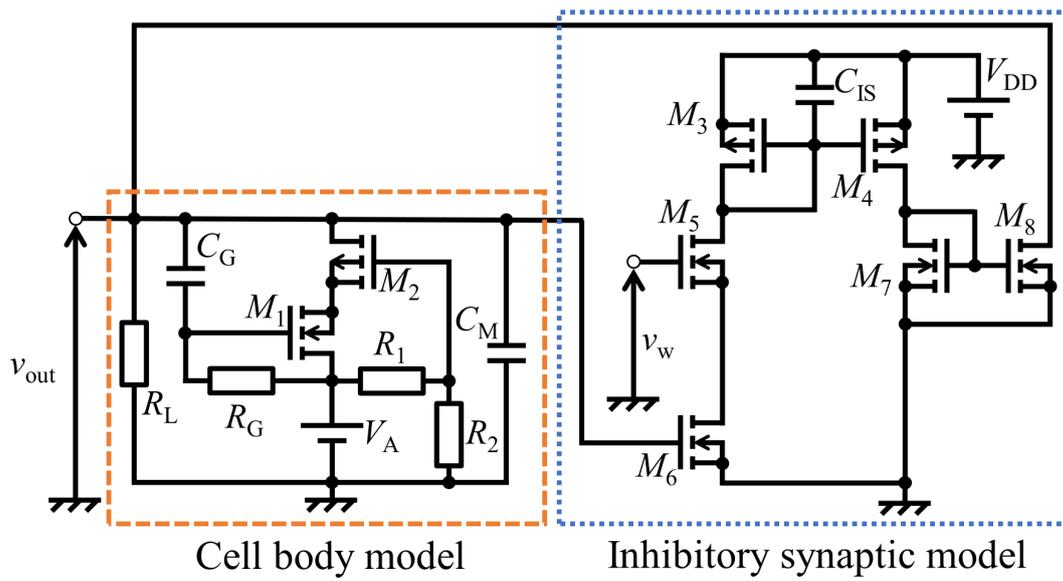


図 3-1 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の回路図

要件 1 は、第 2 章で述べた抑制性シナプスモデルに MOSFET M_5 を追加し、細胞体モデルの出力電圧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)することで満足させた。 M_5 に印加する電圧 v_w に応じて、抑制性シナプスモデルが細胞体モデルの発振を抑制する強さが変化することによって、 T が変化する。自己抑制をもつ P-HNM を四足歩行ロボットシステムに実装する際には、足裏に取り付けた圧力センサの出力に応じて v_w を変化させた。 v_w をマイコンによって生成し、自己抑制をもつ P-HNM に印加した。 v_w に対する T の変化の傾きを、四足歩行ロボットシステムに搭載したマイコンが生成する電圧の分解能(約 0.8 mV)に対して急峻に設計した場合、足裏に掛かっている圧力の大きさと自己抑制をもつ P-HNM に印加されている v_w との間の乖離が大きくなる。

要件 2 は、第 4 章で述べる脚の駆動方法における適当なパルス周期を事前に計算することは困難であるため、自己抑制をもつ P-HNM の回路定数は実験的に決定した。四足歩行ロボットシステムの関節のサーボモータを制御するマイコンは、パルスが入力されるたびに割り込み処理を実行することによって、関節を一定角度ずつ回転するため、短いパルス周期に設計した場合、関節のサーボモータは滑らかに動作する。しかし、パルス周期が短くなるほど、時間あたりに割り込み処理を実行する回数が増加するため、マイコンが圧力を読み取る処理を実行する周期が長くなる。したがって、圧力センサによって取得した圧力がリアルタイムにパルス周期に反映されなくなる。一方で、パルス周期が長くなるほど、脚の動作のリアルタイム性が失われる。そこで、 T が最も短い状態で約 1 ms、 v_w によって T が最も長くなった状態で約 5 ms になる回路定数とした。すなわち、関節を一定角度ずつ回転する割り込み処理は、 T が最も短い状態で約 1 kHz、最も長くなった状態で約 200 Hz で実行される。第 4 章の実験において、四足歩行ロボットシステムは、この回路定数の自己抑制をもつ P-HNM を用いて歩容を生成することが可能であった。

要件 3 は、 v_{out} がマイコンの割り込みトリガ電圧(約 1.7 V)以上かつ、動作電圧の 3.3 V までとなる回路定数に設計することで満たした。ただし、周辺回路を追加する必要があるが、自己抑制をもつ P-HNM とマイコンの間に昇圧、または降圧回路を組み込むことで、この範囲外の v_{out} であっても利用可能である。

自己抑制をもつ P-HNM の抑制性シナプスモデルは、細胞体モデルが発振した際に、シナプス荷重コントロール電圧 v_w に応じた電流を引き抜く。電流を引き抜かれた細胞体モデルは、パルスの生成が抑制され、 T が長くなる。図 3-2 にディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の PSpice によるシミュレーション結果を示す。同図のシミュレーションでは、 v_w を 0 V から 1.0 V に変更しており、これによって T が長くなることを示している。ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性を図 3-3 に示す。同図は、 $v_w = 2.0$ V から $v_w = 3.0$ V の範囲において、 T が約 1.0 ms から約 5.0 ms に長くなることを示している。四足歩行ロボットシステムにおける同回路は、足裏の圧力が増加することによって v_w が高くなり、 T が長くなる。

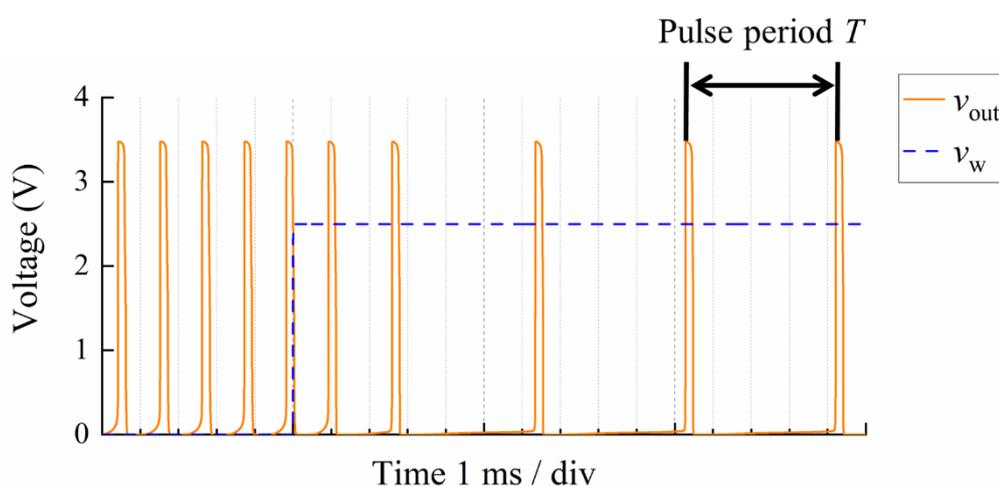


図 3-2 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例(シミュレーション結果)

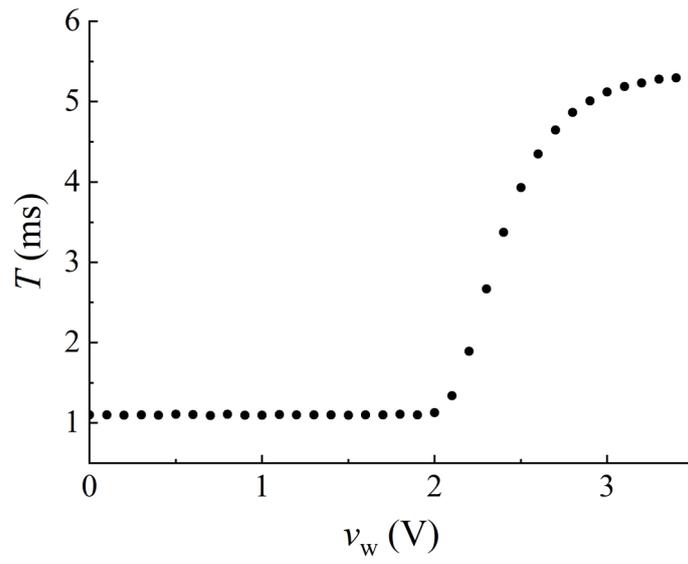


図 3-3 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性(シミュレーション結果)

3-2 ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の測定結果

四足歩行ロボットシステムに実装するにあたり，ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM を Flame Retardant-4 (FR-4 と略記) 基板に実装した (図 3-4 参照)．図 3-5 に，FR-4 基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例を示す．また，図 3-6 に，FR-4 基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM の， v_w に対する T の変化特性の測定結果の一例を示す．電源電圧は $V_A = 2.72 \text{ V}$ ， $V_{DD} = 5.0 \text{ V}$ である．同図は， v_w が 0.9 V から 1.2 V の 0.3 V の間で，パルス周期が 2 倍程度変化することを示している．四足歩行ロボットシステムの歩容の生成には，この範囲を使用した．この範囲におけるパルス周期の変化特性は式(3-1)によって近似できる．

$$T = 5.0 v_w^2 - 8.0 v_w + 3.9 \quad (3-1)$$

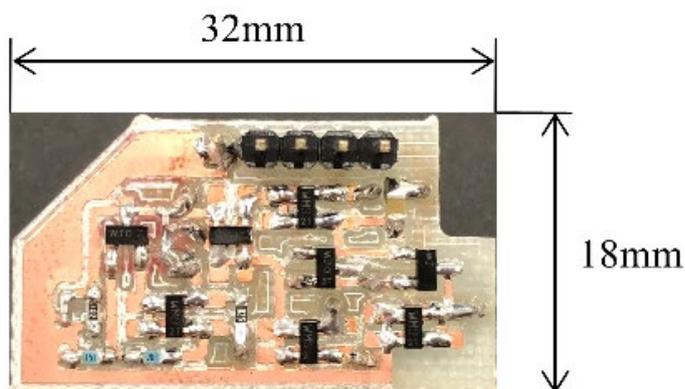


図 3-4 FR-4 基板に実装したディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM

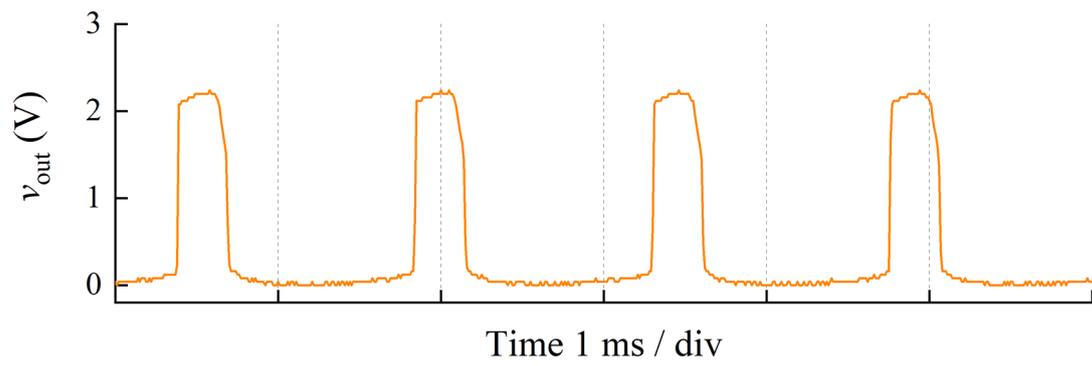


図 3-5 FR-4 基板に実装したディスクリット素子による自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例

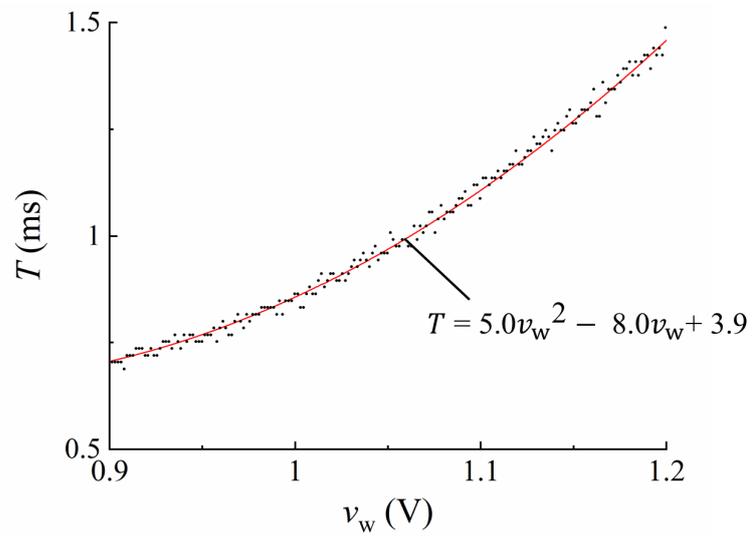


図 3-6 FR-4 基板に実装したディスクリット素子による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性

図 3-7 に、四足歩行ロボットシステムに実装した 4 枚のディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の V_A に対する T の変化特性の測定結果を示す。測定時の電源電圧は $V_{DD} = 0 \text{ V}$, $v_w = 0 \text{ V}$ である。図中の No. 1, 2, 3, 4 は、各基板の測定結果を示している。図中のプロットがある範囲が、自己抑制をもつ P-HNM が発振する V_A の範囲である。例えば、No. 1 の基板の測定結果では、 $V_A = 2.2 \text{ V}$ 付近から $V_A = 2.9 \text{ V}$ 付近までの範囲で発振ことを示している。図 3-7 より、各基板の自己抑制をもつ P-HNM が発振する V_A の範囲と、 T は大きく異なっているため、これらの基板を四足歩行ロボットシステムに実装する際には、基板ごとに V_A を個別に設定する必要があった。

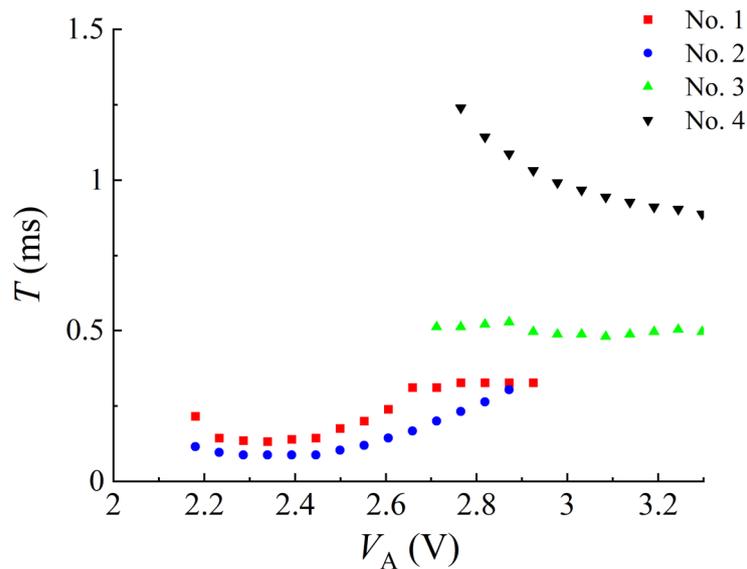


図 3-7 四足歩行ロボットシステムに実装した自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の V_A に対する T の変化特性

図 3-8 に、図 3-7 で測定した各基板において、 V_A を共通とした場合の、 v_w に対する T の変化特性を測定した結果を示す。測定時の電源電圧は、全ての基板に実装した、自己抑制をもつ P-HNM が発振することが可能な $V_A = 2.90 \text{ V}$, $V_{DD} = 5.0 \text{ V}$ とした。図中の No. 1, 2, 3, 4 は、図 3-7 の基板の番号と対応する。自己抑制をもつ P-HNM は、発振が可能な V_A の範囲において、 V_A が低いほど抑制性シナプスモデルによる T の延長が大きくなる性質があるため、発振が可能な範囲の下限に近い V_A を印加されている No. 3, 4 は T が大きく変化し、No. 1, 2 は、 V_A が発振の可能な範囲の上限に近いいため、 T にはほとんど変化がない。

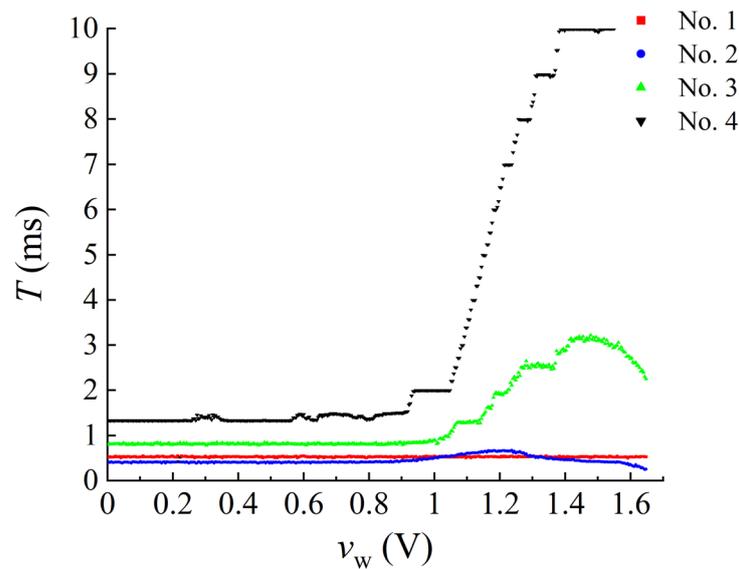


図 3-8 四足歩行ロボットシステムに実装した自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の v_w に対する T の変化特性

図 3-7, 図 3-8 に示したように, 四足歩行ロボットシステムに実装した基板の特性のばらつきは, 四足歩行ロボットシステムの実験において, 電気的な外乱要素となる. したがって, 第 4 章の四足歩行ロボットシステムの実験では, 足裏の圧力に対して各脚を同様に動作させるために, V_A , 圧力フィードバックのゲイン σ , 自己抑制をもつ P-HNM がパルスを出力するたびに関節を回転する角度 θ を回路の特性に合わせて個別の値に設定する必要があった. 四足歩行ロボットシステムに実装する自己抑制をもつ P-HNM の特性のばらつきの低減に対しては, 第 5 章において, 自己抑制をもつ P-HNM を IC に実装することで改善した.

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

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の構成要素は、機械構成要素と電気構成要素に分けられる。本章では、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の構成要素と脚の制御方法を説明し、歩行実験の結果を示す。図 4-1 に自己抑制をもつ 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の外観を示す。

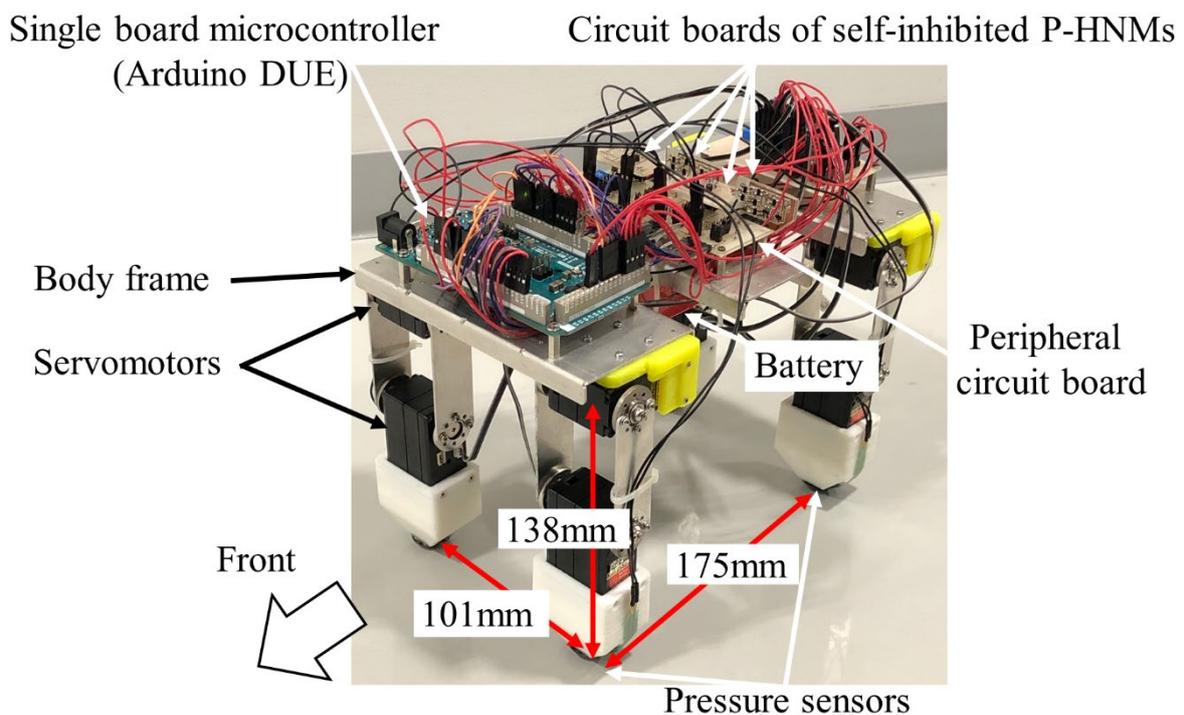


図 4-1 自己抑制をもつ P-HNM を用いて歩容を生成する四足歩行ロボットシステムの外観

4-1 機械構成要素

四足歩行ロボットシステムの機械構成要素は、胴体フレームと4本の脚である。脚の動作による歩容の生成に焦点を当てるために、四足歩行ロボットシステムの関節は脚部のみに配置した。各脚の関節は2箇所であり、構造は共通である。図4-2に示すように、脚はPart A, B, Cとサーボモータ(KRS-2552 RHV ICS)で構成した。足の裏には滑り止めのゴムを取り付けた。脚の付け根側の関節の軸から脚の先端までの長さは138mm、前後脚間の距離は175mm、左右脚間の距離は101mmである。

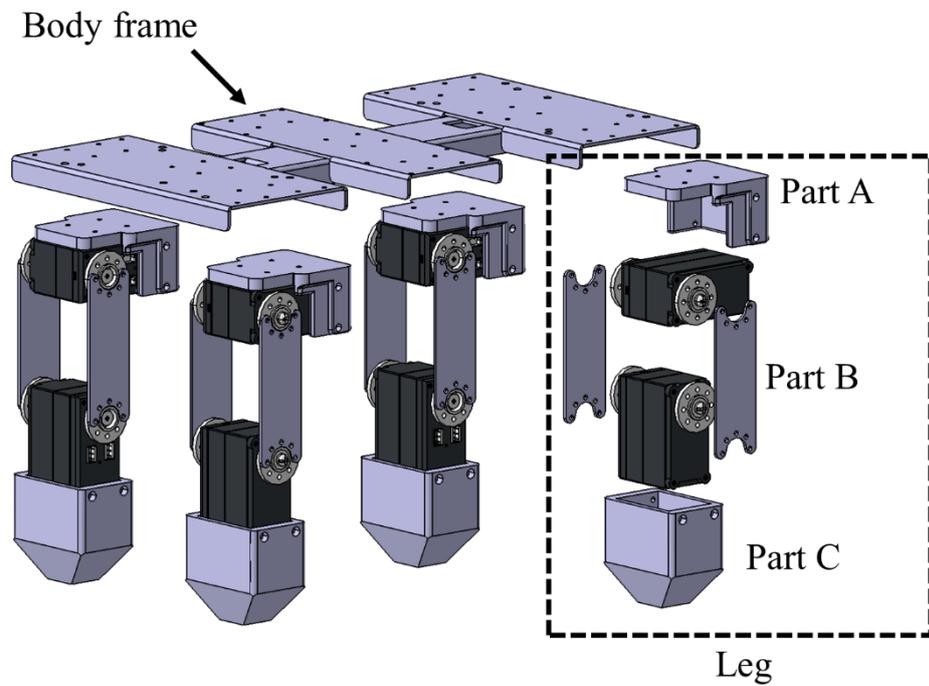


図 4-2 四足歩行ロボットシステムの胴体フレームと脚の構造

胴体フレームは、図 4-3 に示すように、Part 1, 2, 3, 4 で構成し、各脚を取り付けた。Part 1, 2, 3, 4, B はアルミ合金板を機械加工して作製した。さらに、Part 1, 2, 3, 4 には、曲げ加工を施した。Part A, C は 3D プリンタによって作製した。四足歩行ロボットシステムの質量は約 1.1kg である。

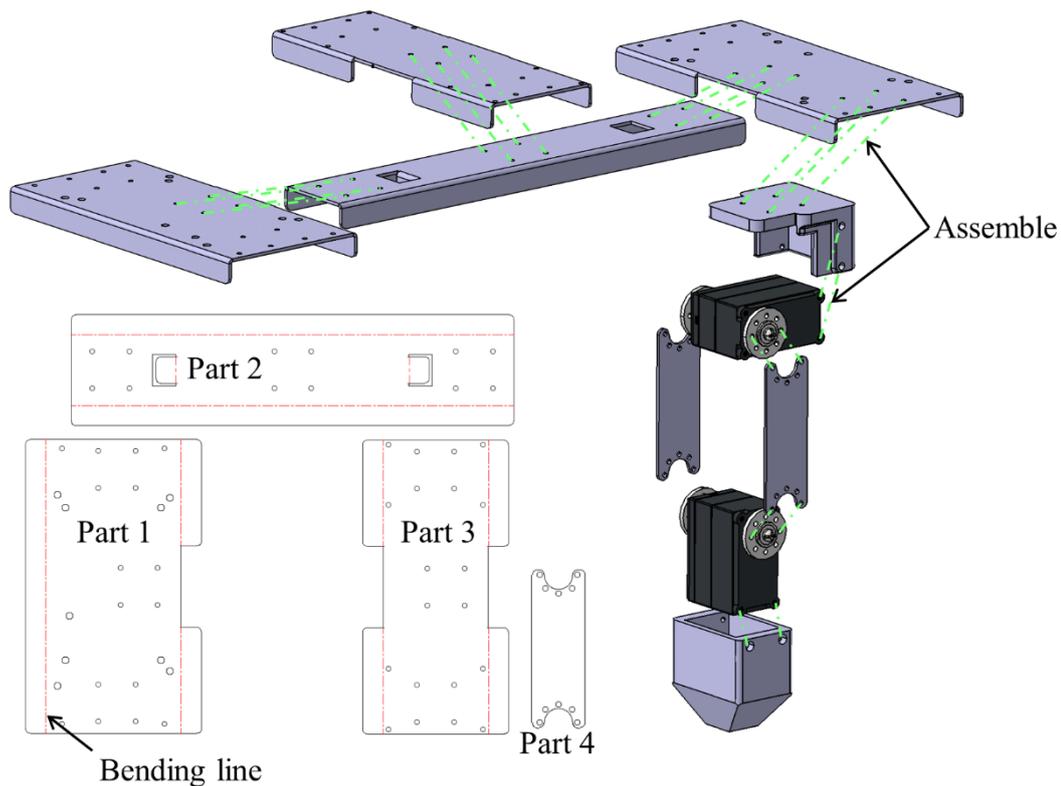


図 4-3 四足歩行ロボットシステムの各パーツの構造

4-2 電気構成要素

四足歩行ロボットシステムの電気構成要素は、自己抑制をもつ P-HNM 回路基板、圧力センサ(FSR402: Interlink Electronics)、周辺回路基板、マイコンである。また、四足歩行ロボットシステムとの物理的な接続が、実験の結果を記録する際に実験結果に与える影響を排除するため、バッテリーと Bluetooth モジュールを搭載した。搭載した自己抑制をもつ P-HNM 回路基板は、第 3 章で測定結果(図 3-7, 図 3-8)を示した 4 枚の基板である。圧力センサは、表面に加わっている圧力に応じて電気抵抗が変化するデバイスであり、各脚の Part C と滑り止めの間に取り付けることにより、足裏の圧力の測定に使用した(図 4-4 参照)。

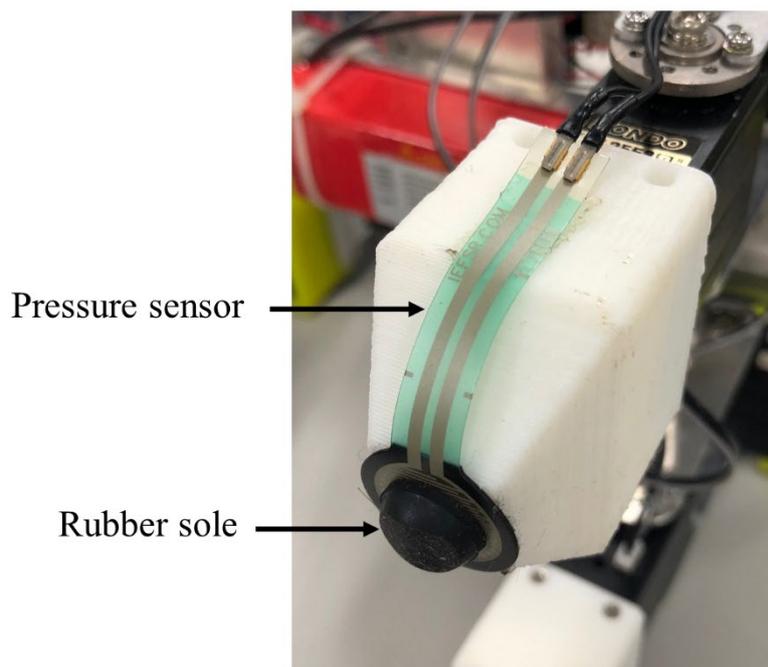


図 4-4 足裏の拡大図

自己抑制をもつ P-HNM 回路基板と圧力センサ，サーボモータを周辺回路基板によってマイコンと接続し，各脚の関節を個別に制御する脚制御システムを構築した．1本の脚を制御する，脚制御システムの構成を図 4-5 に示す．1台のマイコンに，4組の脚制御システムを接続することにより，四足歩行ロボットシステムとした．図 4-6 に，周辺回路基板と自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の接続を示す．周辺回路基板は， C_F, R_F による積分回路， U_1 によるバッファ回路， U_2 によるバッファ回路， $R_{D1, D2}$ による分圧回路， R_{D3} による分圧回路によって構成した．周辺回路基板は，以下の3つの機能を有する．

1. 足裏の圧力センサの電気抵抗を R_{D3} による分圧回路によって v_{pressi} としてマイコンに入力する
2. マイコンが v_{pressi} に応じて出力する Pulse Width Modulation(PWM)による電圧を C_F, R_F による積分回路で積分し， U_1 によるバッファ回路， $R_{D1, D2}$ による分圧回路を通して，自己抑制をもつ P-HNM 回路基板に v_{wi} として入力する
3. 自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の出力電圧 v_{outi} を， U_2 によるバッファ回路を通してマイコンに入力する

ここで，下付き文字の i は， i 番目の脚における変数であることを示す．周辺回路の回路定数は， $C_F = 3.3 \mu\text{F}$, $R_F = 11 \text{ k}\Omega$, $R_{D1, D2, D3} = 11 \text{ k}\Omega$ であり，オペアンプは， $U_{1, 2}$: LMC6032 である．

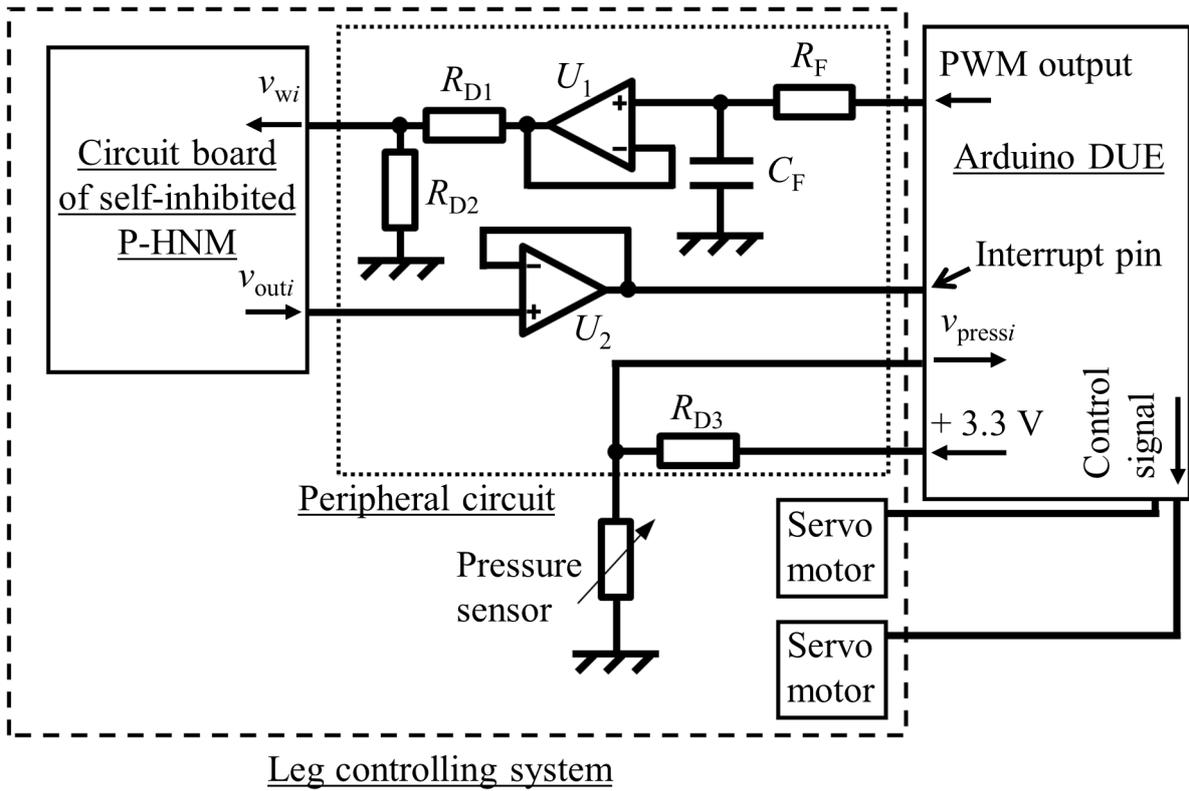


図 4-5 脚制御システムの構成

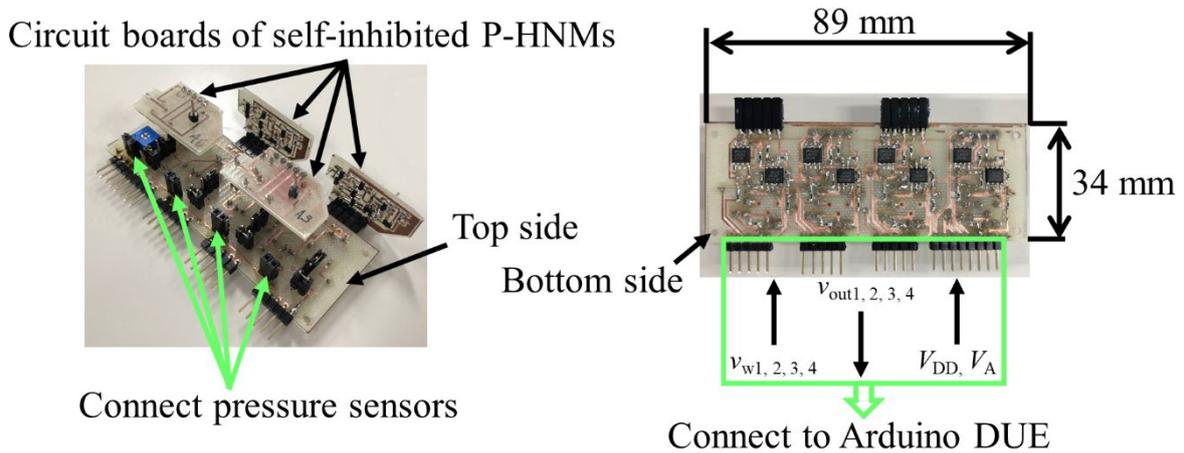


図 4-6 周辺回路基板と自己抑制をもつ P-HNM 回路基板の接続

4-3 四足歩行ロボットシステムの関節の制御

図 4-7 に、マイコンの動作の概要を示す。マイコンは、まず、初期化フェーズで、関節の角度、 V_A , v_w , V_{DD} , θ を初期化する。次に、 v_{press} を読み取り、 v_{press} に応じて v_w を変更する。その後は、 v_{press} の読み取りと v_w の変更を繰り返す。 i 番目の脚の v_w は式(4-1)によって計算される。ここで、 v_{w0} は、自己抑制をもつ P-HNM の回路基板に印加する最低の電圧であり、図 3-6 の例では 0.9 V である。自己抑制をもつ P-HNM は、印加される v_w が高いほど T が長くなるため、足裏の圧力が強いほど T が長くなる。

$$v_{wi} = v_{w0i} + \sigma v_{pressi} \quad (4-1)$$

初期化フェーズ以降は、4 つの個別の割り込みピンに入力される v_{outi} が割り込み処理をトリガする電圧(約 1.7 V)を超えるたびに、 i 番目の脚の関節の角度を変更する割り込み処理(図 4-7 右側)を実行する。すなわち、自己抑制をもつ P-HNM がパルスを生成するたびに、割り込み処理を実行する。割り込み処理では 2 つの処理を行う。割り込み処理の 1 番目の処理では、脚先が図 4-8, 図 4-9 に示す目標点を順に辿るように、関節の回転方向が決定される。割り込み処理の 2 番目の処理では、関節を θ (°)回転する。脚先が目標点 $P_{1,2,3,4}$ を順に辿ることで 1 周期の脚の動作となる。例えば、脚先が目標点 P_3 にある左前脚に対応した自己抑制をもつ P-HNM がパルスを出力すると、目標点 P_4 に向かって左前脚の関節の角度を θ 変更する。したがって、関節の角速度 ω_i (°/s)は式(4-2)で表される。

$$\omega_i = \frac{\theta}{T_i} \quad (4-2)$$

式(4-2)は、 T が短いほど単位時間あたりのパルス数が多くなるため、脚の動作が早くなり、 T が長いほど遅くなることを示している。 T に応じて ω をリアルタイムに変化させるためには、 θ を 1 周期の脚の動作に対して非常に小さい値に設定する必要がある。

マイコンは、それぞれの脚における変数を個別に扱うため、各足裏の圧力や関節の角度を他の脚の関節を制御する際に用いない。しかし、各脚は胴体フレームによって機械的に結合されているため、力学的に相互作用がある。各脚の圧力の差によって ω は異なる値となり、各脚の動作に位相差(歩容)を生じる。

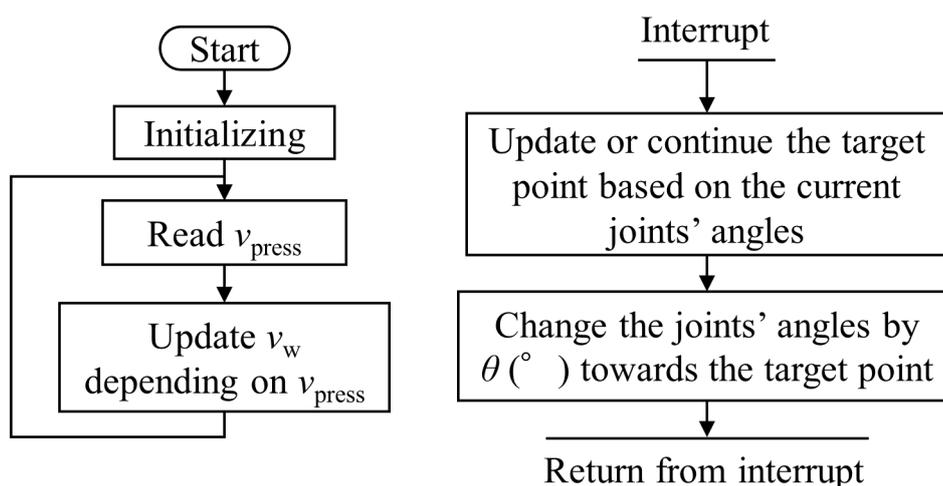


図 4-7 マイコンの動作の概要

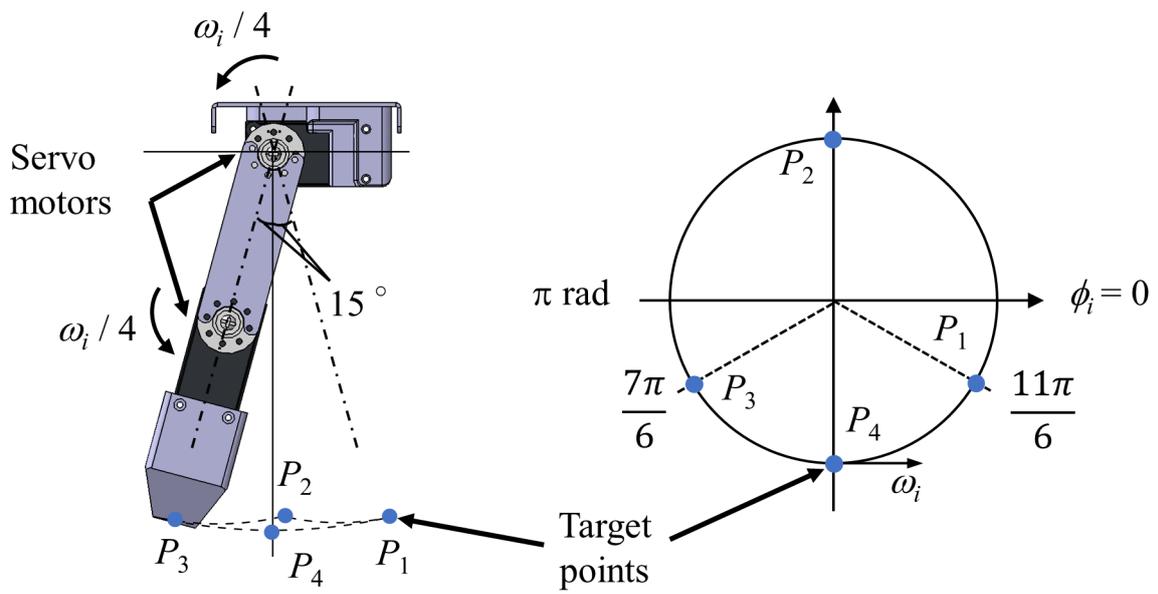


図 4-8 1 周期の脚の動作による脚先の軌道と各目標点の位相

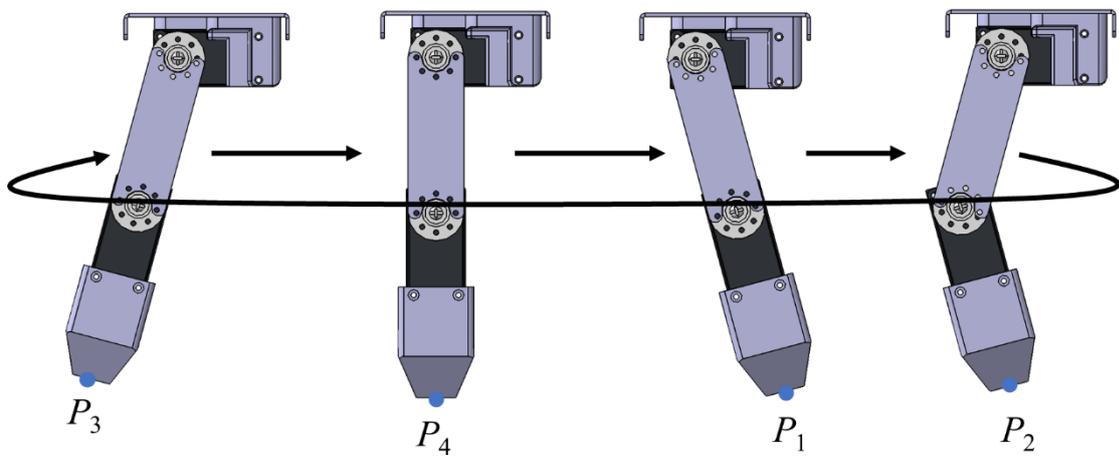


図 4-9 1 周期の脚の動作と各目標点における脚の角度

4-4 四足歩行ロボットシステムによる歩容の生成

四足歩行ロボットシステムを平坦な床に置き，低速で歩行をさせる実験と，高速で歩行をさせる実験を行った．低速で歩行をさせる実験では， $\theta = 0.012^\circ$ ，高速で歩行をさせる実験では， $\theta = 0.0243^\circ$ とした．定数の σ ， θ は，歩容を数周期維持する値を実験的に求めた．どちらの実験においても共通の実験条件として，各脚の初期位相は $3\pi/2$ の直立状態とし，すべての脚を同時に動作開始させ，実験中の σ ， θ は一定とした．

図 4-10，図 4-11 に低速，高速で歩容を生成した際の歩行の様子，脚の動作の位相，脚間の位相差を示す．図中の破線は，1 周期の脚の動作を示す．脚間の位相差は，左前脚から他の脚への位相差として示した．どちらの結果においても，四足歩行ロボットシステムは，実験開始から数周期の脚の動作の後に四足歩行動物の歩容を生成した．図 4-10 は左前脚(LF)，左後脚(LH)，右前脚(RF)，右後脚(RH)の順に 90° の位相差の Walk の歩容である．図 4-11 は LF と RH, RF と LH の順に 180° の位相差の Trot の歩容である．図 4-10 と図 4-11 のどちらの実験においても，四足歩行ロボットシステムは，生成した歩容を維持した期間は短く，5 周期程度であった．歩容を維持した期間が短い原因として，電氣的な外乱要素と機械的な外乱要素の影響があったためであると考えられる．

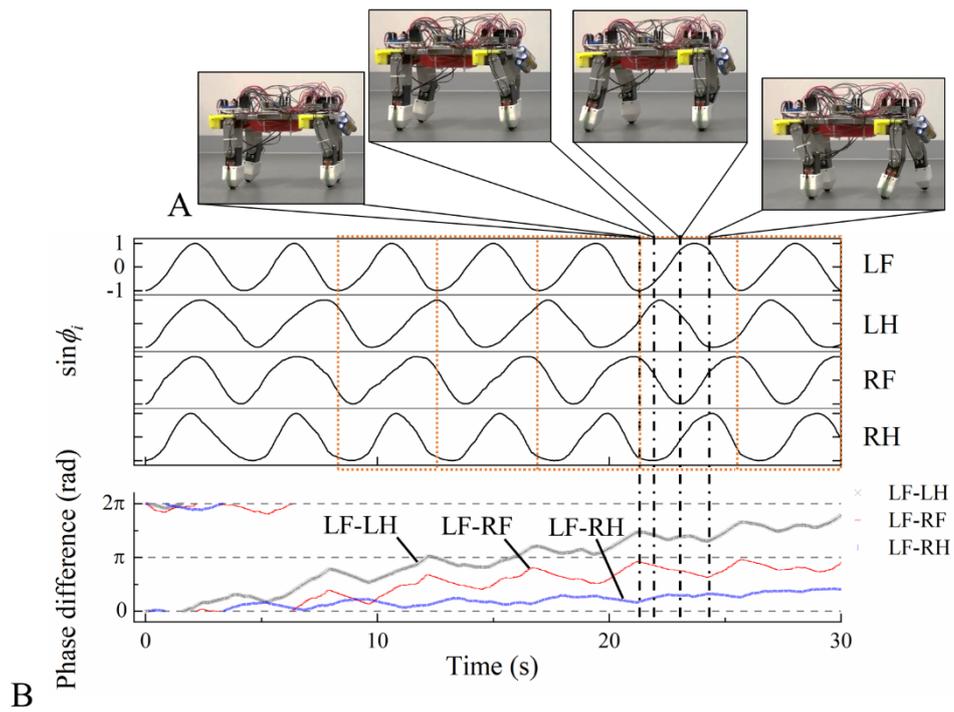


図 4-10 低速で歩行をさせる実験における各脚の位相と位相差の遷移

A: 歩行時の四足歩行ロボットシステム B: 各脚の位相と位相差の遷移

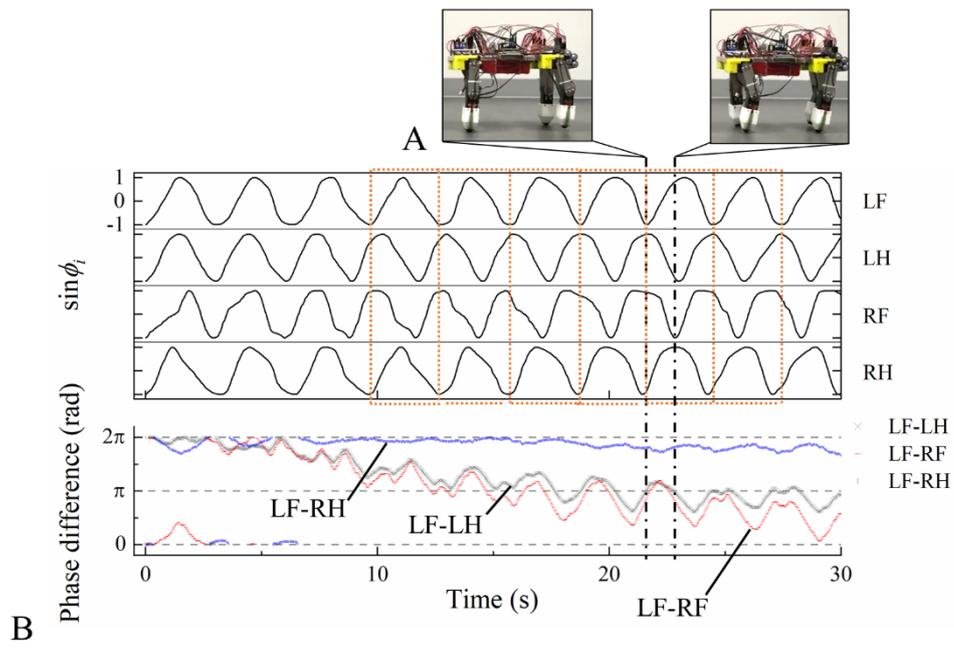


図 4-11 高速で歩行をさせる実験における各脚の位相と位相差の遷移

A: 歩行時の四足歩行ロボットシステム B: 各脚の位相と位相差の遷移

以上の実験結果より，自己抑制をもつ P-HNM を用いた四足歩行ロボットシステムが，四足歩行動物と同様に，低速の歩行では Walk の歩容，高速の歩行では Trot の歩容を生成することを明らかにした．電気的な外乱要素に対しては，第 5 章において，自己抑制をもつ P-HNM を IC チップに実装することによって低減する検討を行う．機械的な外乱要素に対しては，第 6 章において，理想的な空間でロボットをシミュレーションすることが可能な動力学シミュレータを用いた検討を行う．

第5章集積回路(IC)による自己抑制をもつ P-HNM

第4章では，ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM が歩容の生成に利用可能であることを示したが，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，数周期の間であった．この原因として，機械的，電気的な外乱要素の影響が考えられる．本章では，電気的な外乱要素として考えられる，回路ごとの特性のばらつきを低減するために IC チップに実装した，自己抑制をもつ P-HNM の設計と，測定結果を示す．

5-1 IC による自己抑制をもつ P-HNM の設計

四足歩行ロボットシステムに実装する，自己抑制をもつ P-HNM の回路間の特性のばらつきは，各脚の足裏の圧力に対する挙動に差異を生じるため，ばらつきは可能な限り小さくする必要がある．そこで，自己抑制をもつ P-HNM を回路間のばらつきの低減が期待できる IC チップに実装するために，ディスクリート素子による P-HNM の回路内の線形抵抗を MOSFET に置き換えた，IC による自己抑制をもつ P-HNM を設計した．IC による自己抑制をもつ P-HNM の回路図を図 5-1 に示す．IC による自己抑制をもつ P-HNM の回路定数は，ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM と同様に，四足歩行ロボットシステムに実装するための要件を満たす値に設計した．回路定数は， $M_{C1} = W/L = 3/10$ ， $M_{C2} = W/L = 1.2/10$ ， $M_{C3,4} = W/L = 10/1.2$ ， $M_{IS1,5}: W/L = 10/100$ ， $M_{IS2,6}: W/L = 40/2$ ， $M_{IS3}: W/L = 10/10$ ， $M_{IS4}: W/L = 20/2$ ， $C_G = 10 \text{ nF}$ ， $C_M = 20 \text{ pF}$ ， $C_{IS} = 100 \text{ pF}$ である．ここで， W はチャネル幅(μm)， L はチャネル長(μm)を表す．

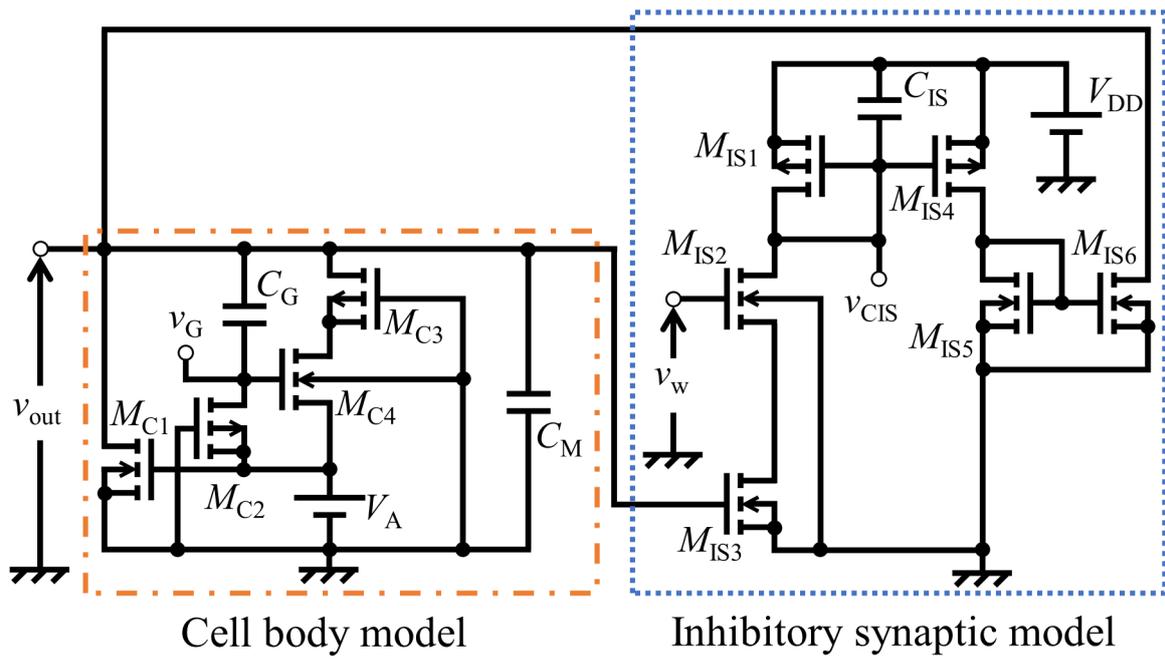


図 5-1 IC による自己抑制をもつ P-HNM の回路図

ICによる自己抑制をもつP-HNMの出力電圧の一例のシミュレーション結果を図5-2に示す。シミュレーションにはHSPICEを用いた。電源電圧は $V_A = 2.80\text{ V}$, $V_{DD} = 3.30\text{ V}$ である。図5-2は、 $v_w = 1.0\text{ V}$ における、設計したICによる自己抑制をもつP-HNMの v_{out} は、マイコンの割り込みトリガ電圧より低いことを示している。したがって、四足歩行ロボットシステムに同回路を実装する際は、 v_{out} を割り込みトリガ電圧を超えるように増幅してマイコンに印加する必要がある。

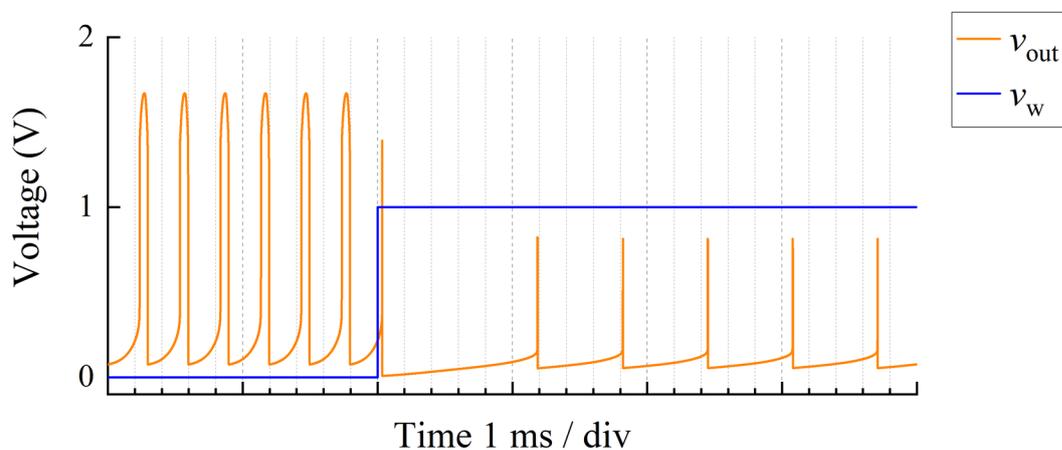


図5-2 ICによる自己抑制をもつP-HNMの出力電圧の一例(シミュレーション結果)

図 5-3 に、IC による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性のシミュレーション結果を示す. 図 5-3 のシミュレーション結果は、 $v_w = 0.3$ V から $v_w = 0.6$ V の、 0.3 V の間で T が 1.5 ms 程度から 3.2 ms の約 2 倍に長くなることを示している. T の変化は、ディスクリット素子による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性のシミュレーション結果(図 3-3)の約 5 倍に対して小さいが、四足歩行ロボットシステムが歩行時に使用した T の範囲(図 3-6)の約 2 倍と同等である. また、 T が変化する v_w の範囲は 0.3 V であり、図 3-6 に示した結果と同等であることから、設計した IC による自己抑制をもつ P-HNM を四足歩行ロボットシステムに実装した際も歩容の生成が可能であると考えられる.

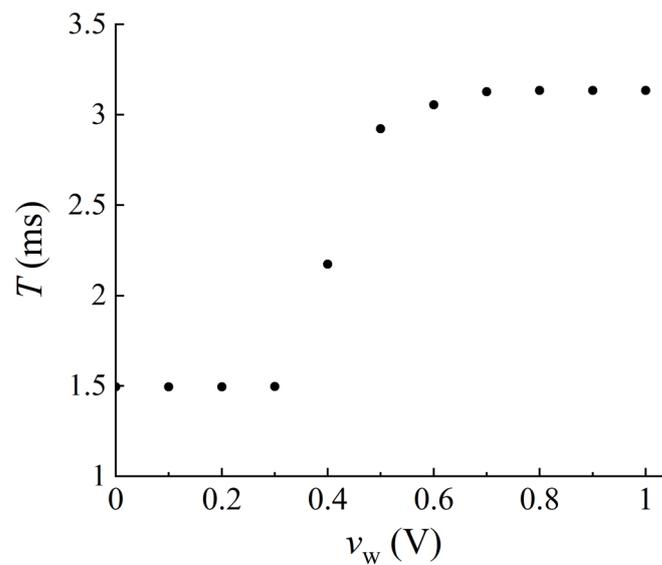


図 5-3 IC による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性
(シミュレーション結果)

ICによる自己抑制をもつ P-HNM を，四足歩行ロボットシステムに必要な 4 回路実装した IC チップを設計した．図 5-4 に，設計した IC チップ全体のレイアウト図，図 5-5 に，1 回路の自己抑制をもつ P-HNM のレイアウト図を示す．回路内の C_G は，IC チップ内に実装できない容量であるため，IC チップの外部の， v_G , v_{out} のパッド間に実装した．IC チップの設計には $0.8 \mu\text{m}$ のプロセスルールを適用した．設計した IC は外部ファウンダリを利用し，QFP80 としてパッケージングした．パッケージング後の寸法は $17 \times 17 \text{ mm}$ であった．ベアチップのサイズは $2.4 \times 2.4 \text{ mm}$ である(図 5-6 参照)．

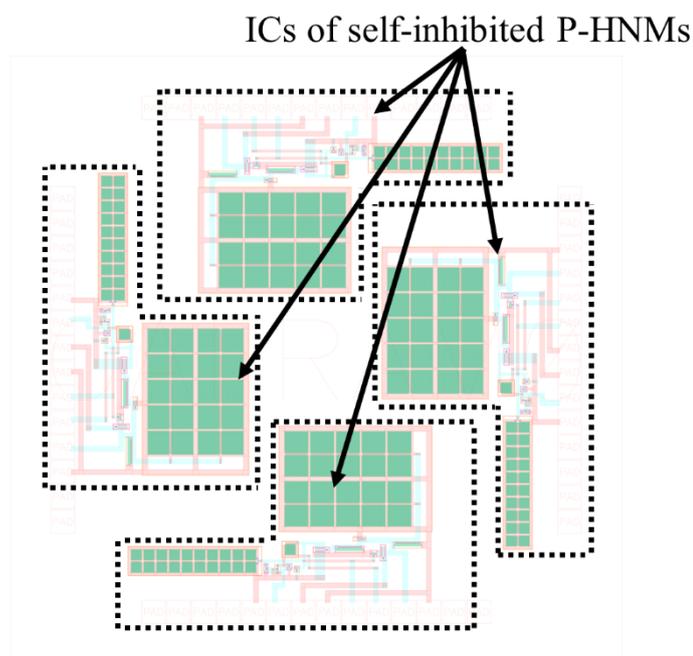


図 5-4 自己抑制をもつ P-HNM を実装した IC チップ全体のレイアウト図

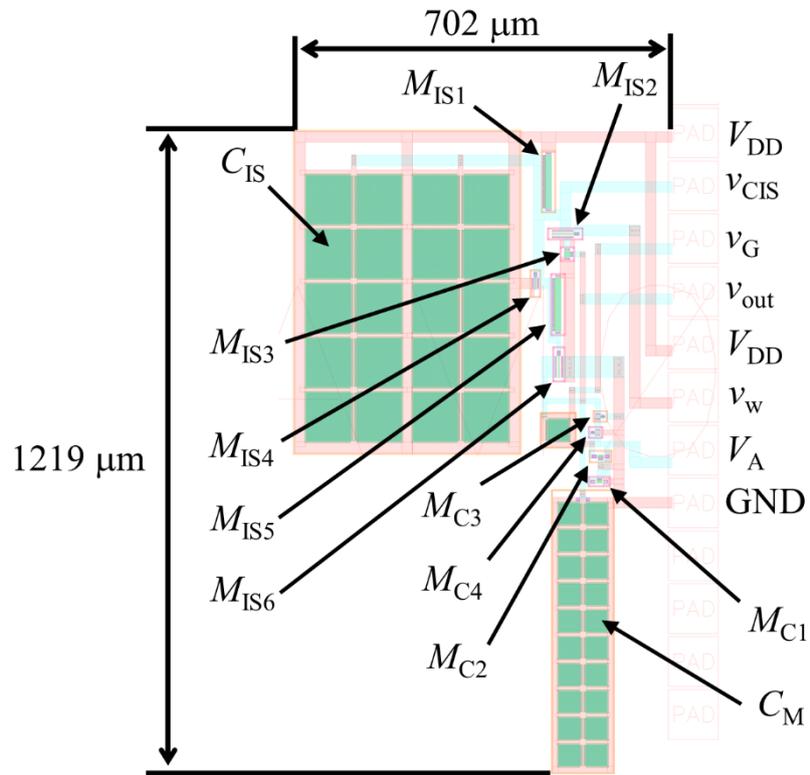


図 5-5 ICチップに実装した自己抑制をもつ P-HNM のレイアウト図

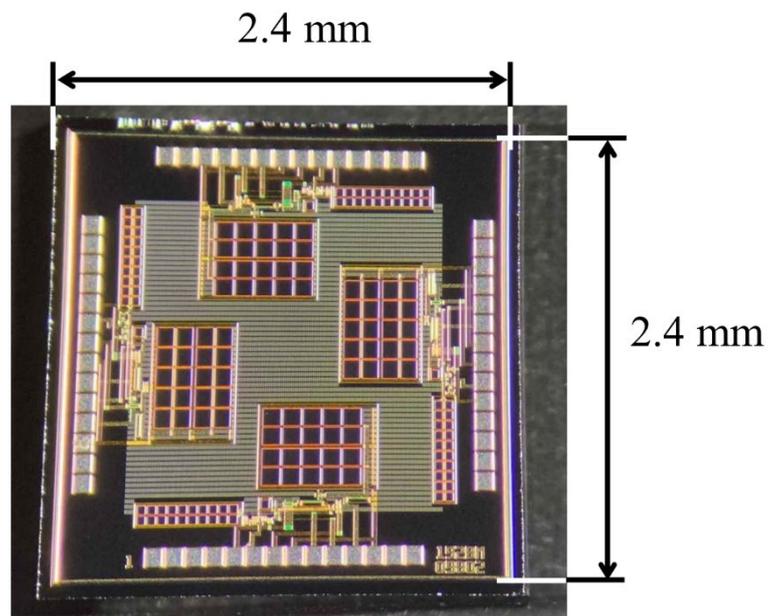


図 5-6 自己抑制をもつ P-HNM のベアチップの外観

5-2 ICチップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の測定結果

図 5-7 に IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例を示す。図 5-8 に、製造した 1 枚のチップ内の 4 回路における、 V_A に対する T の変化特性の測定結果を示す。測定条件は、 $V_{DD} = 0 \text{ V}$ かつ、 $v_w = 0 \text{ V}$ である。同図は、FR-4 基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM の測定結果(図 3-7)と比較して、IC の各回路の V_A に対する T の変化特性のばらつきが極めて小さいことを示している。また、 $V_{DD} = 0 \text{ V}$ かつ、 $v_w = 0 \text{ V}$ の測定条件であり、抑制性シナプスモデルを機能させていないため、細胞体モデルの特性のばらつきが低減されたことを示している。

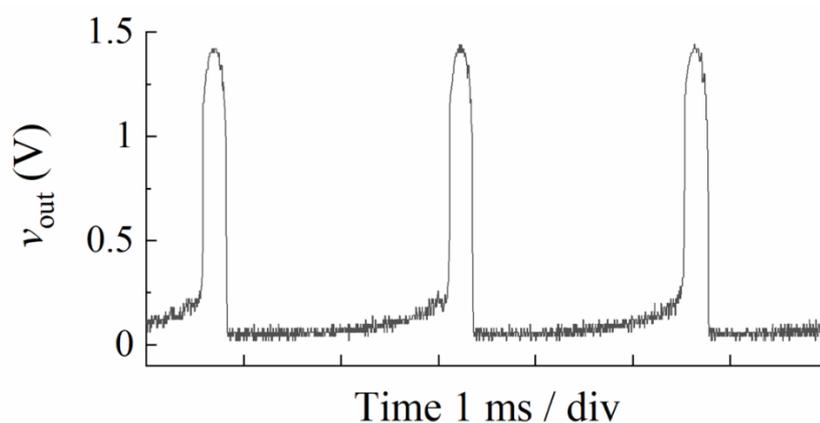


図 5-7 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例

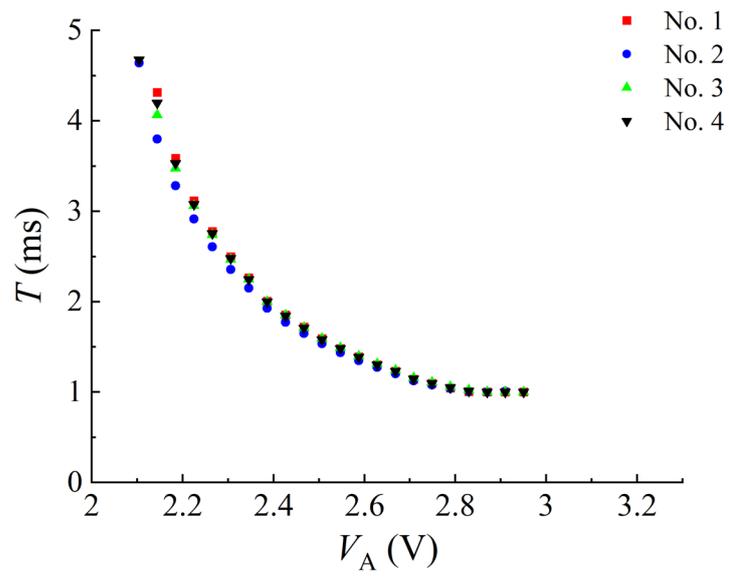


図 5-8 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の V_A に対する T の変化特性

図 5-9 に、図 5-8 で測定した IC チップにおける、 v_w に対する T の変化特性の測定結果を示す。測定条件は、 $V_A = 2.89 \text{ V}$, $V_{DD} = 3.30 \text{ V}$ である。同図は、同 IC チップ内のそれぞれの IC による自己抑制をもつ P-HNM がディスクリート回路による P-HNM と同様に、 v_w に応じてパルス周期を変化する特性を有することを示している。 v_w に対する T の変化特性は、FR-4 基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM の測定結果(図 3-7)と比較すると、各回路における T の下限(約 1.0 ms)および、上限(約 2.1 ms)のばらつきは大きく低減された結果となった。 T の上限にはばらつきがあるが、この影響は、 $T = 2.0 \text{ ms}$ までの範囲を四足歩行ロボットシステムに用いることで排除が可能である。 v_w に対する T の変化特性のばらつきが低減された要因として、自己抑制をもつ P-HNM には、図 5-10 に示すように、 V_A に応じて、 v_w に対する T の変化特性が異なる性質があり、細胞体モデルの特性のばらつきが低減されたことが考えられる。

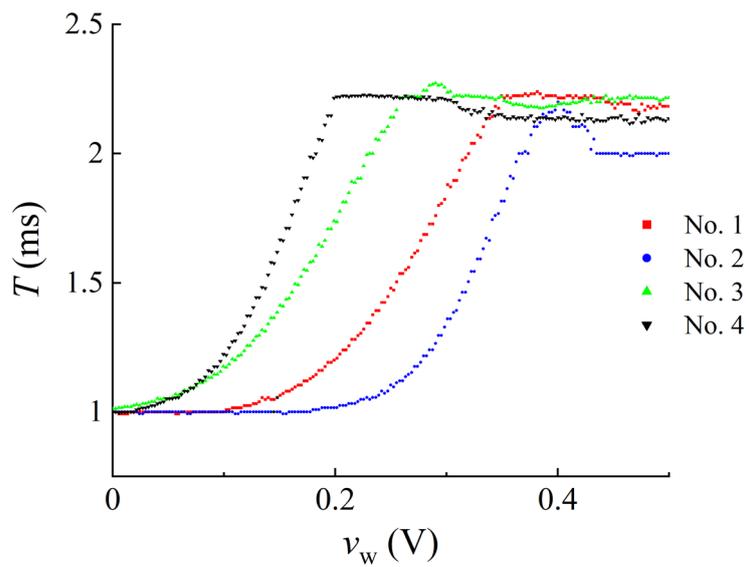


図 5-9 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性

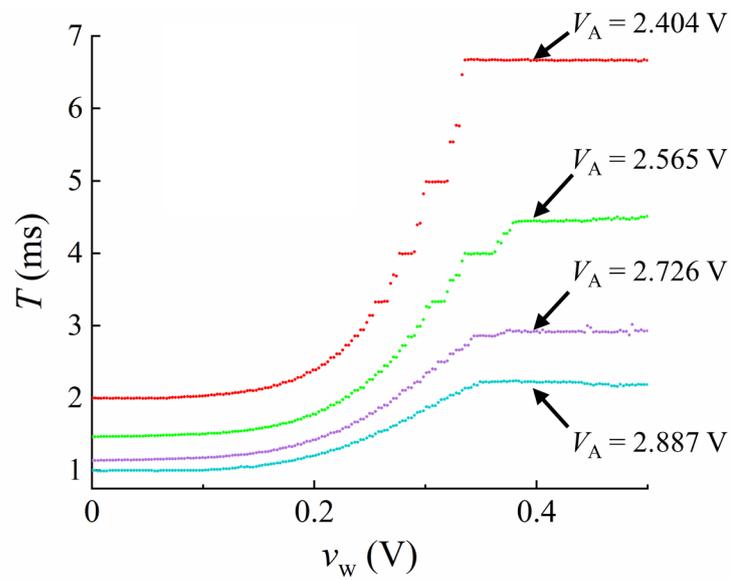


図 5-10 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM (No. 1) の各 V_A における, v_w に対する T の変化特性

5-3 回路定数を変更した IC による自己抑制をもつ P-HNM の設計

5-2 節で測定した IC チップ内の各回路における細胞体モデルの特性は、FR-4 基板に実装した自己抑制をもつ P-HNM と比較して大幅にばらつきが低減された。しかし、 v_w によって T が変化を始める電圧と、 v_w に対する T の傾きにばらつきがあり、四足歩行ロボットシステムに実装する際には v_{w0} と σ を個別に設定する必要があった。このばらつきの原因として、抑制性シナプスモデルの MOSFET M_{IS2} が、製造ばらつきが生じやすいしきい値電圧未満で動作する回路定数であったことが考えられる。そこで、抑制性シナプスモデルの MOSFET M_{IS2} をしきい値電圧以上で動作させるために回路定数を変更した IC チップを設計した。

回路定数を変更した IC による自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例のシミュレーション結果を図 5-11 に示す。回路定数は、 $M_{C1} = W/L = 3/10$, $M_{C2} = W/L = 1.2/10$, $M_{C3,4} = W/L = 10/1.2$, $M_{IS1,2,3,4} : W/L = 10/10$, $M_{IS5} : W/L = 10/100$, $M_{IS6} : W/L = 40/2$, $C_G = 4.7 \text{ nF}$, $C_M = 20 \text{ pF}$, $C_{IS} = 3.3 \text{ nF}$ である。電源電圧は $V_A = 2.55 \text{ V}$, $V_{DD} = 3.30 \text{ V}$ である。図 5-11 より、 $v_w = 1.2 \text{ V}$ における v_{out} は、マイコンの割り込みトリガ電圧より低いため、回路定数変更前と同様に、四足歩行ロボットシステムに同回路を実装する際は、 v_{out} を割り込みトリガ電圧を超えるように増幅してマイコンに印加する必要がある。

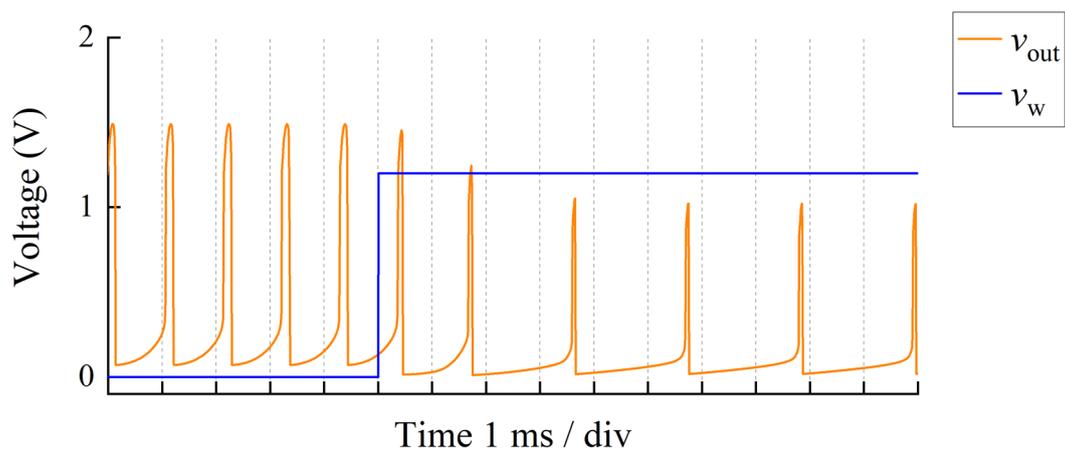


図 5-11 回路定数を変更した IC による自己抑制をもつ P-HNM の出力電圧の一例(シミュレーション結果)

回路定数変更前後の、 v_w に対する T の変化特性のシミュレーション結果の比較を図 5-12 に示す。同図は、変更後の回路定数では、 v_w が 0.5 V から 1.0 V の、0.5 V の間で T が 1.5 ms 程度から 3.2 ms の約 2 倍に長くなることを示している。 v_w に対する T の変化は回路定数変更前と比較して緩やかであり、四足歩行ロボットシステムに実装した際に、足裏の圧力に対して、 v_w を精細に変化させることが可能である。

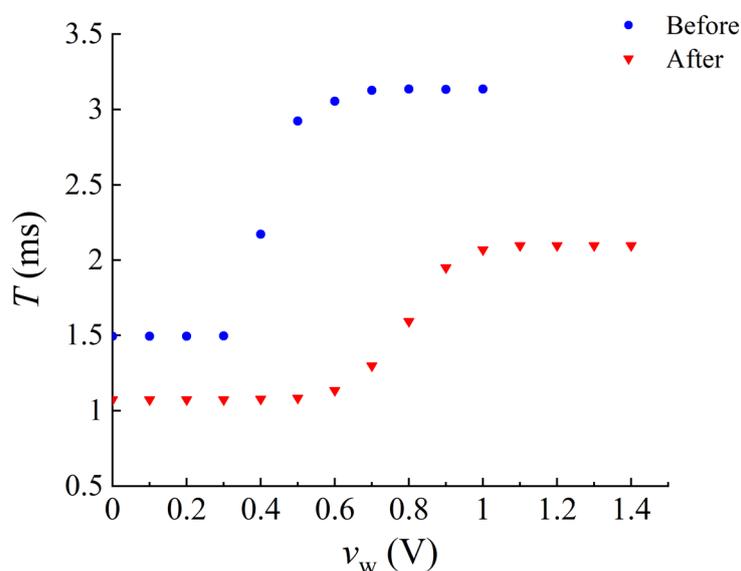


図 5-12 IC による自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性の回路定数変更前後の比較(シミュレーション結果)

回路定数を変更した IC による自己抑制をもつ P-HNM を 4 回路実装した IC チップを設計した. 図 5-13 に, 設計した IC チップ全体のレイアウト図, 図 5-14 に, 1 回路のレイアウト図を示す. 回路内の C_G , C_{IS} は, IC チップ内に実装できない容量であるため, IC チップの外部の, v_G , v_{out} のパッド間, v_{CIS} , V_{DD} のパッド間に実装した. IC チップの設計には $0.8 \mu\text{m}$ のプロセスルールを適用した. 設計した IC は外部ファウンダリを利用し, QFP80 としてパッケージングした. パッケージング後の寸法は $17 \times 17 \text{ mm}$ であった. ベアチップのサイズは $2.4 \times 2.4 \text{ mm}$ である(図 5-15 参照).

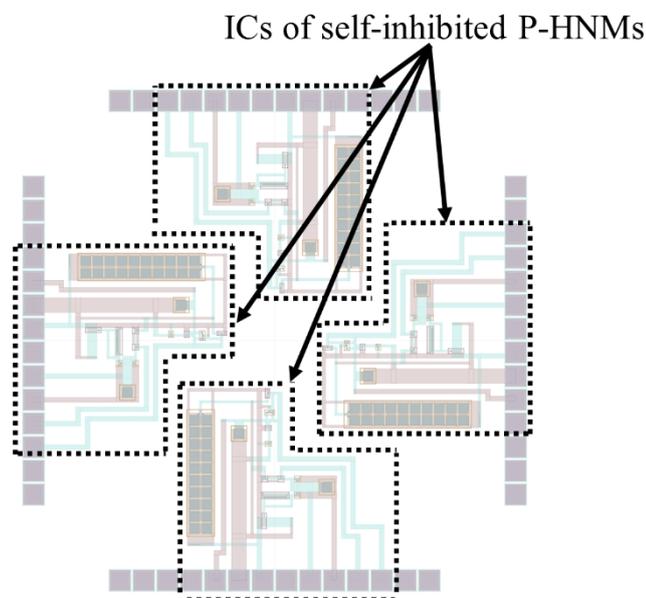


図 5-13 自己抑制をもつ P-HNM を実装した IC チップ全体のレイアウト図
(回路定数変更後)

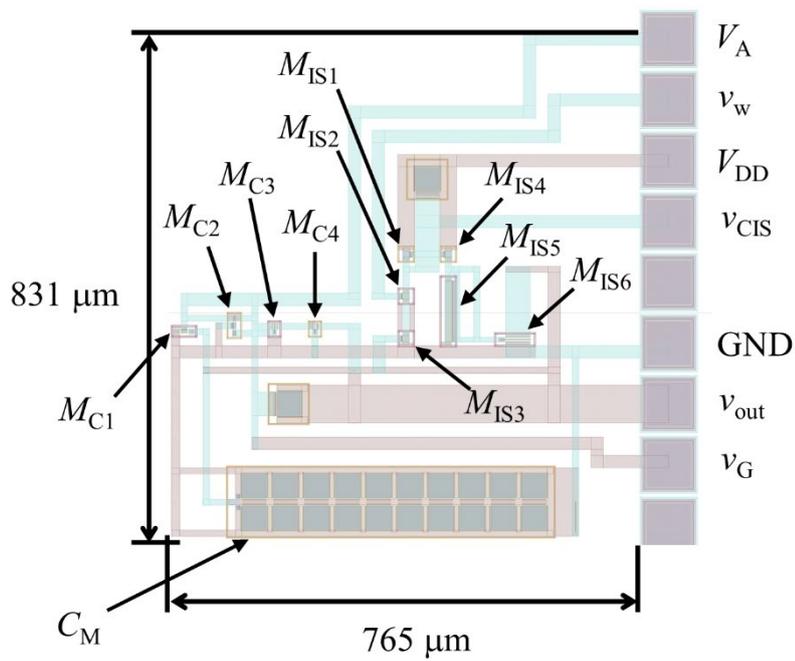


図 5-14 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM のレイアウト図
(回路定数変更後)

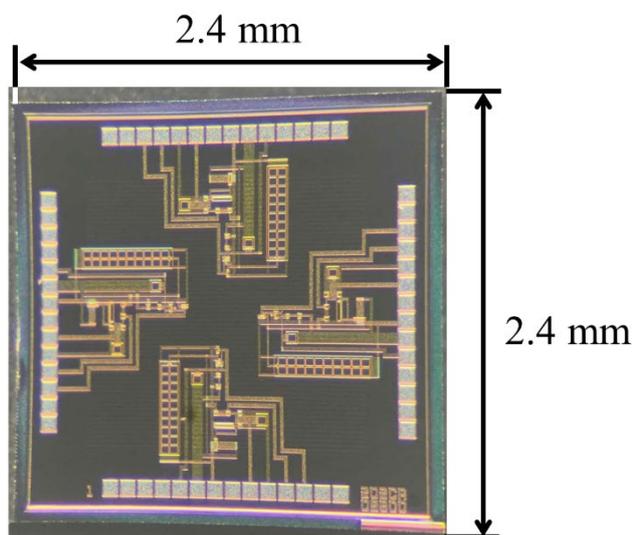


図 5-15 自己抑制をもつ P-HNM のベアチップの外観(回路定数変更後)

5-4 ICチップに実装した自己抑制をもつP-HNMの測定結果(回路定数変更後)

図 5-16 に、回路定数を変更した自己抑制をもつ P-HNM を実装した 1 枚のチップ内の 4 回路における、 V_A に対する T の変化特性の測定結果を示す。測定条件は、 $V_{DD} = 3.3 \text{ V}$ かつ、 $v_w = 0 \text{ V}$ である。同図は、回路定数変更前の測定結果(図 5-8)と同様に、IC の各回路の V_A に対する T の変化特性のばらつきが極めて小さいことを示している。

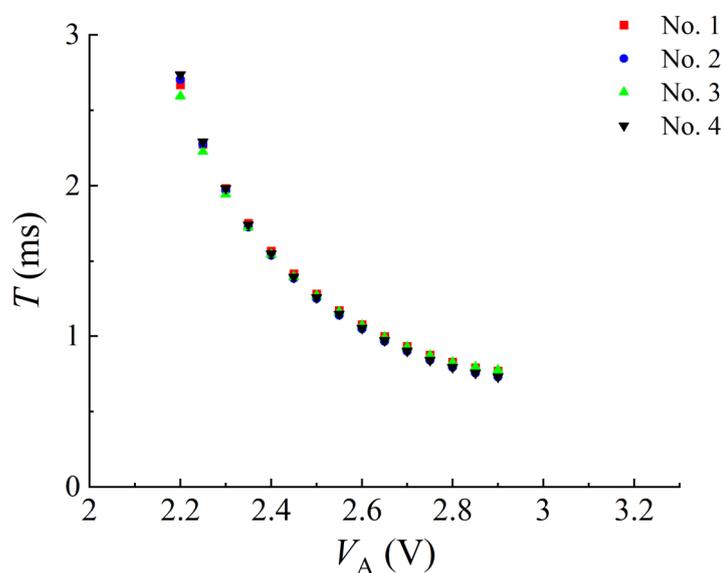


図 5-16 ICチップに実装した自己抑制をもつP-HNMの V_A に対する T の変化特性(回路定数変更後)

図 5-17 に、図 5-16 で測定した IC チップにおける、 v_w に対する T の変化特性の測定結果を示す。測定条件は、 $V_A = 2.45 \text{ V}$, $V_{DD} = 3.30 \text{ V}$ である。図 5-17 は、 $v_w = 0.65 \text{ V}$ から $v_w = 1.0 \text{ V}$ の、 0.35 V の間で T が 1.4 ms 程度から 3.0 ms の約 2 倍に長くなることを示している。また、回路定数変更前の IC チップの測定結果(図 5-9)と比較すると、 v_w によって T が変化を始める電圧と、 v_w に対する T の傾きの回路間のばらつきが極めて小さくなったことを示している。 T の上限にはばらつきがあるが、この影響は、 $T = 3.0 \text{ ms}$ までの範囲を四足歩行ロボットシステムに用いることで排除が可能である。

以上の結果より、回路定数を変更した自己抑制をもつ P-HNM を実装した IC チップを、四足歩行ロボットシステムに実装した、ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM と置き換えることで、各脚の足裏の圧力に対する挙動生じていた差異を大幅に低減することが可能であると考えられる。

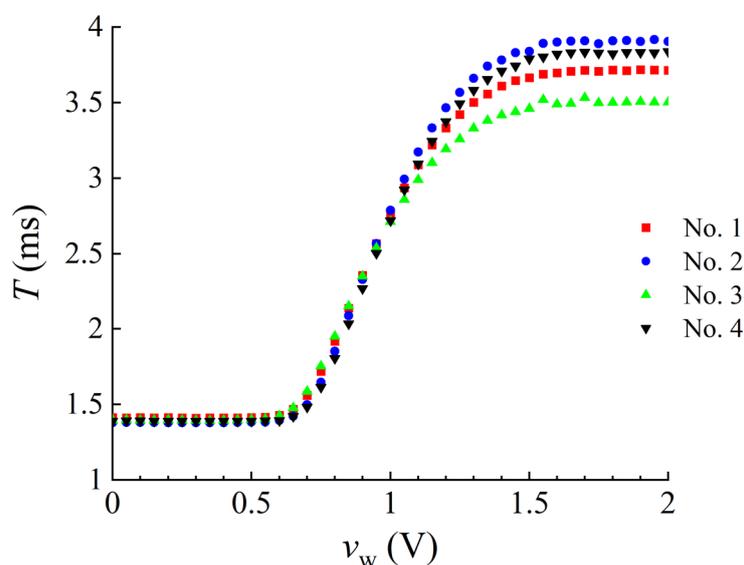


図 5-17 IC チップに実装した自己抑制をもつ P-HNM の v_w に対する T の変化特性(回路定数変更後)

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

機械的な外乱要素を排除した，理想的な空間における四足歩行ロボットシステムの振る舞いを解析するために動力学シミュレータ(CoppeliaSim)に四足歩行ロボットモデルを構築した．本章では，四足歩行ロボットモデルの設計，関節の制御，シミュレーション結果について述べる．

6-1 四足歩行ロボットモデルの設計

図 6-1 に四足歩行ロボットモデルの外観を示す．四足歩行ロボットモデルは，第 4 章の四足歩行ロボットシステムと同様に，胴体と 4 個の脚モジュールで構成した．四足歩行ロボットシステムのサーボモータの機能は，サーボモータの軸の位置に関節を設置することによって，四足歩行ロボットモデルに実装した．各パーツの物理的なパラメータは，第 4 章の四足歩行ロボットシステムのパーツの設計データを用いて設定した．取り込んだ設計データは，胴体フレームと脚，バッテリーである．設定したパラメータの一覧を表 1 に示す．四足歩行ロボットモデルの全体の質量は 1.0kg である．

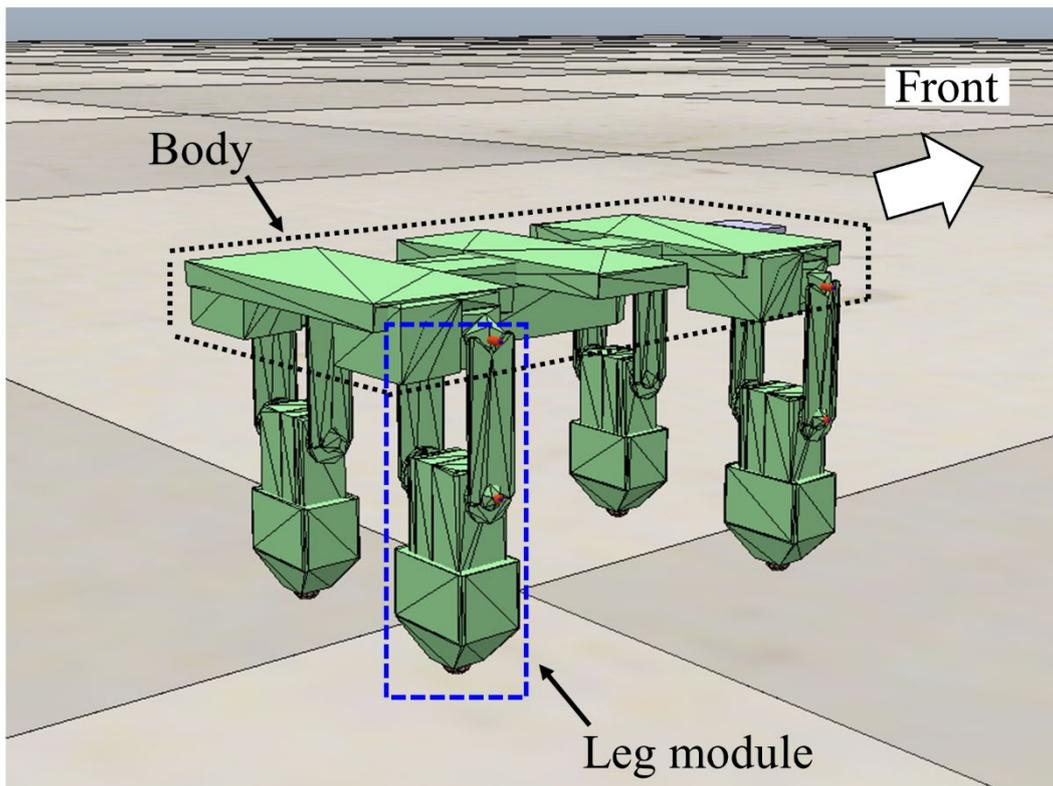


図 6-1 四足歩行ロボットモデルの外観

表 6-1 四足歩行ロボットモデルの各パーツのパラメータ

Name	Mass
Body structure	525 g
Part 1	7.0 g
Part 2	83 g
Part 3	1.0 g
Weight	92 g

図 6-2 に、四足歩行ロボットモデルの胴体の構造を示す。胴体に設置した関節の軸周りに、脚モジュールが回転する。胴体の前方には、重心を調節するためのおもりを設けた。図 6-3 に、脚モジュールの構造を示す。脚モジュールは、Part 1, 2, 3, 関節, 力センサで構成した。4 個の脚モジュールは全て同じ構造である。脚モジュール内の関節の軸周りに、Part 1 から先の、Part 2, 力センサ, Part 3 が回転する。Part 1 は空間で隔てられた 2 つの部品で構成されているが、1 つの部品として機能する。力センサは Part 2 と Part 3 の間に設置し、脚先が床から受ける力の測定に使用した。シミュレータ上の力センサは、3 軸の力を測定可能であるが、四足歩行ロボットシステムでは圧力センサによって垂直方向の力のみを測定して利用していたため、シミュレーションにおいてもセンサに対して垂直な力のみ測定した。

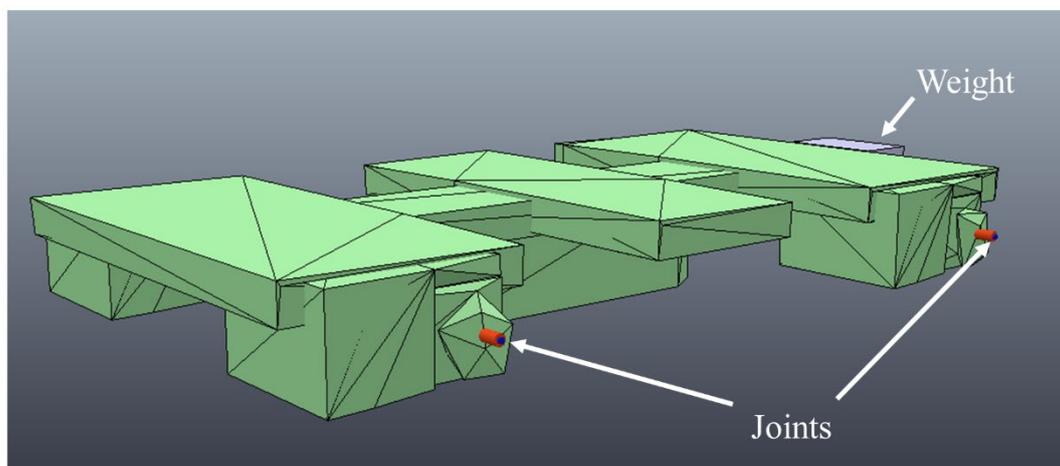


図 6-2 四足歩行ロボットモデルの胴体の構造

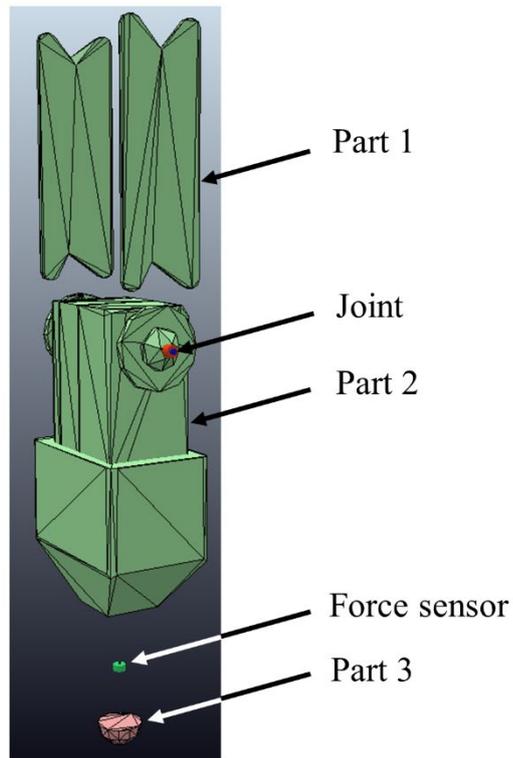


図 6-3 四足歩行ロボットモデルの脚モジュールの構造

6-2 四足歩行ロボットモデルの関節の制御

シミュレータは、四足歩行ロボットシステムに実装した自己抑制をもつ P-HNM をシミュレートしないため、自己抑制をもつ P-HNM の機能は数式によって代替した。自己抑制をもつ P-HNM のパルス周期 T に対応する、関節の駆動周期を定義し、その周期を圧力に応じて延長し、シミュレーション時間が駆動周期を超えるごとに一定角度だけ関節の角度を変更するシミュレーションを構築した。四足歩行ロボットモデルの 1 周期の脚の動作は、四足歩行ロボットシステムの脚の動作(図 4-8, 図 4-9)と同一とした。

図 6-4 にシミュレータが行う処理の概要を示す。シミュレータが行う処理は、初期化フェーズ、メインフェーズ、シミュレーションフェーズに分けられる。初期化フェーズでは、関節の初期角度や、駆動周期 T' (s), その他の定数、変数を初期化する。その後、メインフェーズ、シミュレーションフェーズを実行し、以降は、この 2 つのフェーズを繰り返す。駆動周期は、全ての脚において 0 s として初期化させたため、各脚の関節はシミュレーションの開始後、直ちに駆動する。関節の初期角度は、図 6-1 の直立の状態(位相は $3\pi/2$ rad)として初期化した。

メインフェーズでは、前回、関節の角度を変更した時のシミュレーション時間 T_{pre} (s) から、メインフェーズが開始された時のシミュレーション時間 T_{post} (s) を引いた値が T' 以上の脚があった場合、その脚の関節の目標角度を目標点に向かって θ' ($^\circ$) 変更し、目標角度から脚の位相を計算する。その後、関節の目標角度を変更した脚の T_{post} に対しては、 T_{pre} を代入する。さらに、その脚の足裏の圧力 N ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$) を更新する。また、メインフェーズでは、各関節の角度から各脚の位相を計算し、 N とともに記録する。ただし、各脚の位相は記録するのみで、四足歩行ロボットモデルの制御には用いない。

シミュレーションフェーズでは、シミュレーションを 1 フレーム(10 ms) 進め、各関節の角度をメインフェーズで設定した目標角度に駆動する。し

たがって、 i 番目の脚の駆動周期 T'_i は式(6-1)、関節の角速度 ω'_i は式(6-2)で表される。さらに、式(6-1)と式(6-2)より、 ω'_i は式(6-3)で表される。ここで、 σ' はフィードバックゲイン、 T_0 は $v_w = 0$ V における自己抑制をもつ P-HNM のパルス周期に相当する定数である。

$$T'_i = T_0 + N_i \sigma' \quad (6-1)$$

$$\omega'_i = \frac{\theta'}{T'_i} \quad (6-2)$$

$$\omega'_i = \frac{\theta'}{T_0 + N_i \sigma'} \quad (6-3)$$

四足歩行ロボットシステムでは、自己抑制をもつ P-HNM のパルス周期に応じて時間あたりに割り込み処理が実行される回数が増減し、メインフェーズが実行される周期が増減する。一方で、シミュレータのメインフェーズは、四足歩行ロボットモデルのシミュレーションを停止した状態で実行される。したがって、シミュレータはメインフェーズを 1 フレーム(10 ms)ごとに確実に実行する。

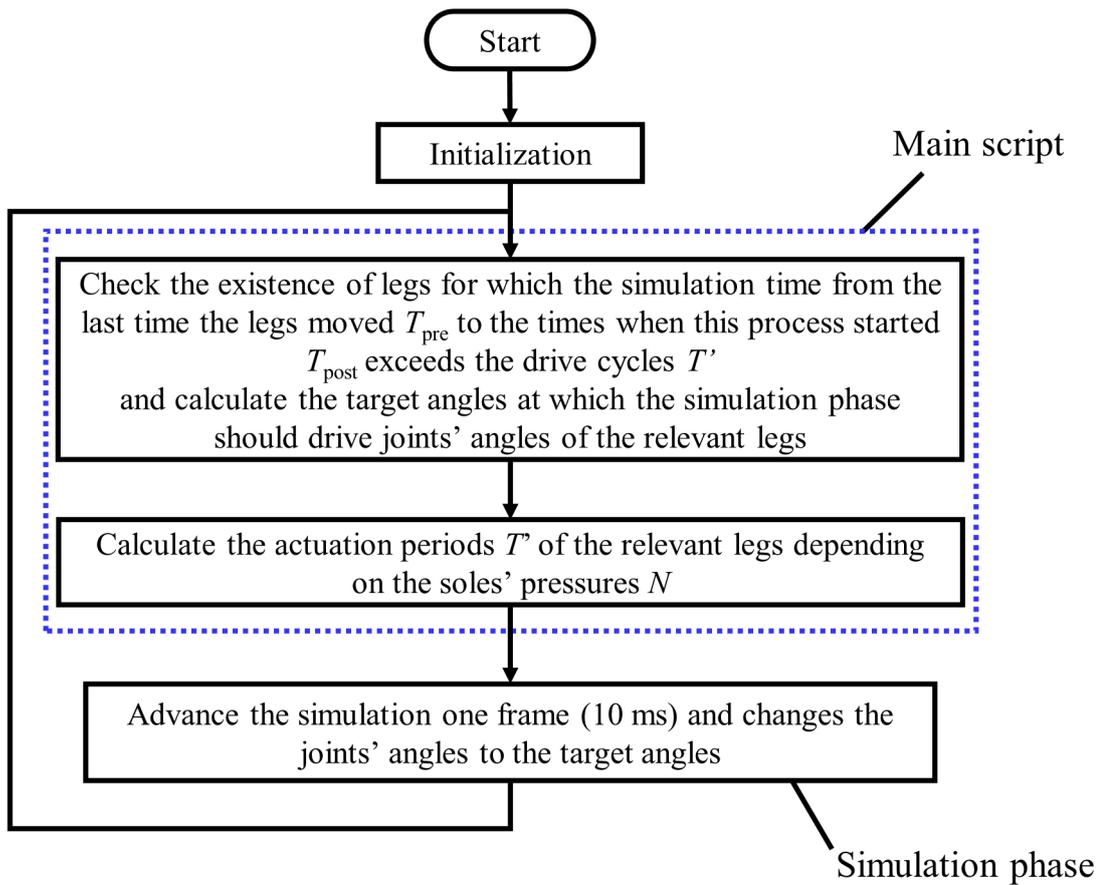


図 6-4 シミュレータの処理の概要

6-3 四足歩行ロボットモデルによる歩容の生成

四足歩行ロボットモデルを十分に広い平坦な床に設置し， θ' のみ異なる複数の条件で 5000 秒間のシミュレーションを実行した． θ' は， 0.20° から 1.4° まで 0.01° ずつ変更した．全てのシミュレーションにおいて， T_0 と σ' は 20 ms と 8.0 とし， θ' を含むこれらの定数はシミュレーション中で一定とした．

四足歩行ロボットモデルは，複数の条件のシミュレーションにおいて，Walk または Trot の歩容を生成した．図 6-5 に，四足歩行ロボットシステムが各歩容を生成した実験条件と，四足歩行ロボットモデルが各歩容を生成したシミュレーション条件の比較を示す．シミュレーションと実験双方において，足裏の圧力に応じて角速度が変化するため，脚が床に接していない状態の角速度を図中の横軸とした．図中の○印は，5 周期以上歩容を維持した条件を示す．同図は，四足歩行ロボットシステムが Walk, Trot の歩容を生成した実験条件の付近のシミュレーション条件において，四足歩行ロボットモデルがそれぞれの歩容を生成したことを示している．また，四足歩行ロボットモデルは，複数の条件で各歩容の生成が可能であり，低速の歩行では Walk，高速の歩行では Trot の歩容を生成する傾向があることを示している．

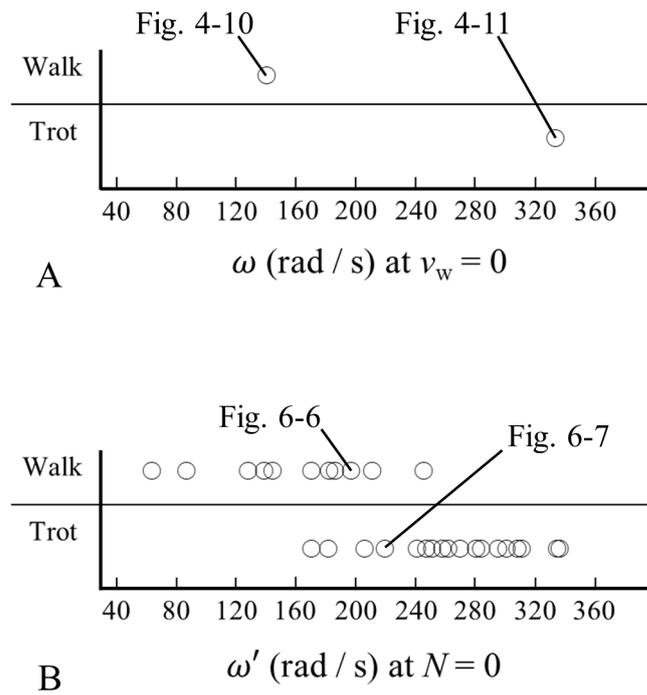


図 6-5 角速度に対する生成された歩容の比較 A: 四足歩行ロボットシステムの実験結果 B: 四足歩行ロボットモデルのシミュレーション結果

図 6-6 に,最も長時間に渡って Walk の歩容を維持したシミュレーションにおける,左前脚を基準とした各脚の位相差の推移を示す.同図のシミュレーションでは, θ' は 0.99° である.同図は,200 s 付近から Walk の歩容が生成され,シミュレーションの終了まで維持されたことを示している.

図 6-7 に,最も長時間に渡って Trot の歩容を維持したシミュレーションにおける,左前脚を基準とした各脚の位相差の推移を示す.同図のシミュレーションでは, θ' は 1.09° である.同図は,700 s 付近から Trot の歩容が生成され,シミュレーションの終了まで維持されたことを示している.

以上の結果より,四足歩行ロボットモデルが四足歩行ロボットシステムと同様に,低速の歩行では Walk,高速の歩行では Trot の歩容を生成することを明らかにした.また,機械的な外乱のない理想的な空間において,四足歩行ロボットモデルが生成した歩容を長期間に渡って維持することを明らかにした.

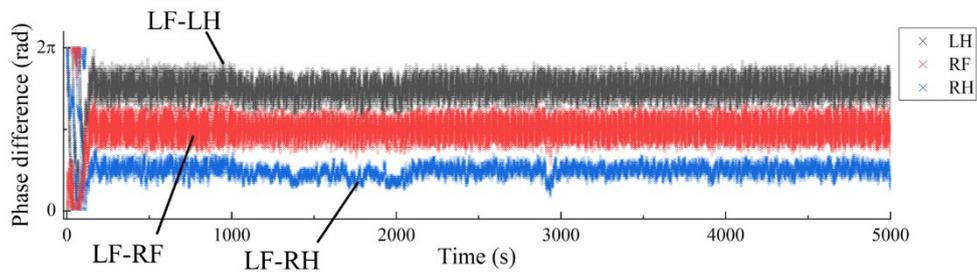


図 6-6 四足歩行ロボットモデルを低速で歩行させた場合の位相差の遷移の一例

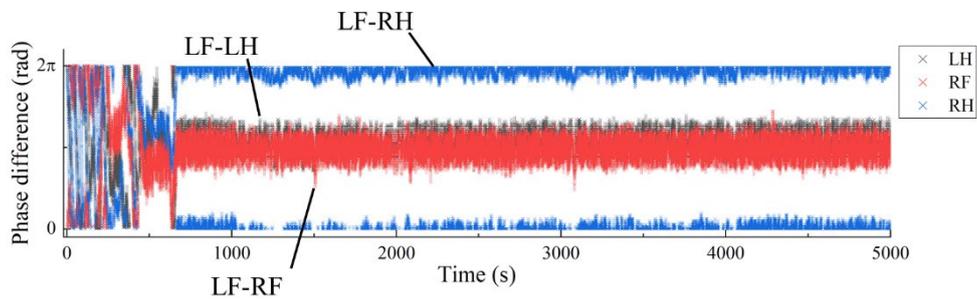


図 6-7 四足歩行ロボットモデルを高速で歩行させた場合の位相差の遷移の一例

第7章 結論

本論文では，パルス形ハードウェアニューロンモデル(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について検討を行った．第3章以下が，筆者が行った研究成果であり，第3章では，四足歩行ロボットシステムに実装して歩容の生成に利用するために用いた，ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の要件を示し，ディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の特性の測定結果を示した．第4章では，ディスクリート素子による自己抑制をもつ 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の構成要素と，脚の駆動方法を示した．また，実験により，四足歩行システムが，歩行の早さに応じて四足歩行動物の Walk と Trot の歩容を生成することを明らかにした．第5章では，特性のばらつきが大きかったディスクリート素子による自己抑制をもつ P-HNM の回路構成を一部変更した回路を4回路実装した集積回路(IC)チップを設計した．さらに，ICチップの測定の結果，回路間の特性のばらつきが低減したことを示した．また，回路定数を変更した IC チップを開発し，回路定数変更後の IC チップに実装した回路の特性を測定した結果，回路間の特性のばらつきが極めて小さくなったことを示した．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た四足歩行ロボットモデルが，四足歩行ロボットシステムと同様に，歩行の早さに応じて四足歩行動物の Walk と Trot の歩容を生成することを明らかにした．また，それらの歩容を長期間維持することを示した．

以上のことより，本論文では，自己抑制をもつ P-HNM を用いた方法論が四足歩行動物の歩容を生成する事を明らかにした．また，自己抑制をもつ P-HNM 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 P-HNM 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．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，日頃より懇切な御指導，御鞭撻を賜りました日本大学工学部精密機械工学科齊藤健教授に心から感謝を致します．

本論文をまとめるにあたり，有益なご助言を頂きました日本大学工学部精密機械工学科内木場文男教授，日本大学工学部精密機械工学科羽多野正俊教授，日本大学工学部電子工学科佐伯勝敏教授に厚く御礼申し上げます．

また，日頃よりご指導と御鞭撻を賜っている日本大学工学部精密機械工学科の諸先生方に深く感謝申し上げます．

本研究の遂行にあたり，ご協力頂いた日本大学大学院理工学研究科修士の田澤陸氏，日本大学工学部精密機械工学科マイクロデザイン研究室，日本大学工学部精密機械工学科ニューロロボティクス研究室の在校生の諸氏に感謝致します．

参考文献

- [1] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., & Playter, R. (2008). BigDog, the rough-terrain quadruped robot. In *IFAC Proceedings Volumes* (vol. 41, pp. 10822-10825). Elsevier.
- [2] Fankhauser, P., Bjelonic, M., Bellicoso, B. C., Miki, T., & Hutter, M. (2018). Robust rough-terrain locomotion with a quadrupedal robot. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5761-5768). IEEE.
- [3] Biswal, P., & Mohanty, P. K. (2021). Development of quadruped walking robots: a review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2017-2031.
- [4] Benjamin, B. V., Gao, P., McQuinn E., Choudhary, S., Chandrasekaran, A. R., & Bussat, J. M. (2014). Neurogrid: A mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations. In *Proceedings of the IEEE* (vol. 102, no. 5, pp. 699-716). IEEE.
- [5] Amari, S., Park, H., & Fukumizu, K. (2000). Adaptive method of realizing natural gradient learning for multilayer perceptrons. *Neural Computation*, 12(6), 1399-1409. MIT Press.
- [6] Pastur-Romay, L. A., Porto-Pazos, A. B., Cedrón, F., & Pazos, A. (2017). Parallel computing for brain simulation. *Current Topics in Medical Chemistry*, 17(14), 1646-1668.
- [7] 久保孝富, 幾谷吉晴. (2019). 人の知性を司る脳, その模倣としての機械学習. *システム／制御／情報*, vol. 63, no. 3, pp. 124-129.
- [8] 田中剛平. (2019). リザバーコンピューティングの概念と最近の動向. *電子情報通信学会誌*, vol. 102, no. 2, pp. 108-113.
- [9] 石井信, 岡田真人, 菅生康子, 大羽成征, 山崎匡, 森江隆, 國吉康夫. (2019). 脳型人工知能技術の開発, *人工知能*, vol. 34, no. 6, pp. 817-825.

- [10] Botvinick, M., Wang, J. X., Dabney, W., Miller, K. J., & Kurth-Nelson, Z. (2020). Deep reinforcement learning and its neuroscientific implications. *Neuron*, 107(4), 603-616. Cell Press.
- [11] Aihara, K., & Toyoda, M. (1990). Chaotic neural networks. *Physics Letters A*, 144(6-7), pp. 333-340. Elsevier.
- [12] 染谷和孝, 篠崎秀一, 関根好文. (1997). パルス形ハードウェアカオスニューロンモデルとその分岐現象. *電子情報通信学会論文誌*, vol. J80-C-II, no. 9, pp. 289-296.
- [13] Long, L. N., & Fang, G. (2010). A review of biologically plausible neuron models for spiking neural networks. In *AIAA Infotech@Aerospace 2010*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [14] Almog, A., & Korngreen, A. (2016). Is realistic neuronal modeling realistic? *Journal of Neurophysiology*, 116(5), 2180-2209. American Physiological Society.
- [15] 関根好文, 隅山正巳, 佐伯勝敏, 合原一幸. (2001). エンハンスメント型 MOSFET による Λ 形ニューロンモデル. *電子情報通信学会論文誌 C*, vol. J84-C, no. 10, pp. 988-994.
- [16] 関根好文. (2012). 非線形電子回路の動向. *電気学会論文誌 C*, vol. 133, no. 3, pp. 494-501.
- [17] Grillner, S., & Zangger, P. (1979). On the central generation of locomotion in the low spinal cat. *Experimental Brain Research*, 34, 241-261.
- [18] Marder, E., & Bucher, D. (2001). Central pattern generators and the control of rhythmic movements. *Current Biology*, 11(23), 986-996.
- [19] Frigon, A., & Rossignol, S. (2006). Experiments and models of sensorimotor interactions during locomotion. *Biological Cybernetics*, 95, 607-627.

- [20] Selverston, A. I., & Ayers, J. (2006). Oscillations and oscillatory behavior in small neural circuits. *Biological Cybernetics*, 95, 537-554.
- [21] Bellardita, C., & Kiehn, O. (2015). Phenotypic characterization of speed-associated gait changes in mice reveals modular organization of locomotor networks. *Current Biology*, 25(11), 1426-1436.
- [22] Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, 292, 239-240.
- [23] Taylor, C. R. (1980). Force development during sustained locomotion: a determinant of gait, speed and metabolic power. *Journal of Experimental Biology*, 115(1), 253-262.
- [24] McMahon, T. A. (1985). The role of compliance in mammalian running gaits. *Journal of Experimental Biology*, 115(1), 263-282.
- [25] Bhatti, Z., Waqas, A., Mahesar, A. W., & Karbasi, M. (2017). Gait analysis and biomechanics of quadruped motion for procedural animation and robotic simulation. *Bahria University Journal of Information & Communication Technologies*, 10(2), 1-7.
- [26] Delcomyn, F. (1980). Neural basis of rhythmic behavior in animals. *Science*, 210(4469), 492-498.
- [27] Arshavsky, Y. I., Deliagina, T. G., & Orlovsky, G. N. (2016). Central pattern generators: mechanisms of operations and their role in controlling automatic movements. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 46(6), 696-718.
- [28] 伊藤聡, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美, 柳原大. (1999). 環境の変化に適応する四足歩行ロボットシステム, *日本ロボット学会誌*, vol. 17, no. 4, pp. 595-603.

- [29] 土屋和雄, 辻田勝吉. (2002). Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御. 日本ロボット学会誌, vol. 20, no. 3, pp. 243-246.
- [30] Ishii, T., Masakado, S., & Ishii, K. (2004). Locomotion of a quadruped robot using CPG. In 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (vol. 4, pp. 3179-3184). IEEE.
- [31] 福岡泰宏, 木村浩. (2007). 4 足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行. 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 4, pp. 138-154.
- [32] Wang, J., Wen. J., Chen, W., Yue, H., & Liu, D., A gait generating algorithm with smooth speed transition for the locomotion of legged robots. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 36(2), 260-275.
- [33] Liu, H., Jia, W., & Bi, L. (2017). Hopf oscillator based adaptive locomotion control for a bionic quadruped robot. In 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) (pp. 949-954). IEEE.
- [34] Habu, Y., Yamada, Y., Fukui, S., & Fukuoka, Y. (2018). A simple rule for quadrupedal gait transition proposed by a simulated muscle-driven quadruped model with two-level CPGs. In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 2075-2081). IEEE.
- [35] 伊藤聡, 湯浅秀男, 伊藤宏司. エネルギー消費量による四足歩行パターン遷移の発振器-力学モデル. 計測自動制御学会論文集, vol. 32, no. 11, pp. 1535-1543 (1996)
- [36] Ijspeert, A. J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. Neural Networks, 21, 642-653.
- [37] Aoi, S., Manoonpong, P., Ambe, Y., Matsuno, F., & Wörgötter, F. (2017). Adaptive control strategies for interlimb coordination in legged robots: a review. Frontiers in Neurorobotics, 11(39).

- [38] McGeer, T. (1990). Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62-82.
- [39] 大須賀公一, 桐原謙一. (2000). 受動的歩行ロボット Quartet II の歩行解析と歩行実験, ” 日本ロボット学会誌, vol. 18, no. 5, pp. 737-742.
- [40] Nakatani, K., Sugimoto, Y., & Osuka, K. (2009). Demonstration and analysis of quadruped passive dynamic walking. *Advanced Robotics*, 23(5), 483-501.
- [41] Sugimoto, Y., Yoshioka, H., & Osuka, K. (2011). Development of super-multi- legged passive dynamic walking robot “Jenkka-III”. In *SICE Annual Conference 2011* (pp. 576-579). IEEE.
- [42] 浦大介, 入部正継, 大須賀公一, 衣笠哲也. (2015). 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの一設計方法 -適応的機能を使用した形状と関節自由度構成の設計-. 計測自動制御学会論文集, vol. 51, no. 5, pp. 329-335.
- [43] Owaki, D., Kano, T., Nagasawa, K., Tero, A., & Ishiguro, A. (2012). Simple robot suggests physical interlimb coordination is essential for quadruped walking. *Journal of The Royal Society Interface*, 10(78).
- [44] Owaki, D., & Ishiguro, A. (2017). A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping. *Scientific Reports*, 7(277), 1-10
- [45] Shinomoto, S., Kuramoto, Y. (1986). Phase transitions in active rotator systems. *Progress of Theoretical Physics*, 75(5), 1105-1110.
- [46] Shinomoto, S., Kuramoto, Y. (1986). Cooperative phenomena in two-dimensional active rotator systems. *Progress of Theoretical Physics*, 75(6), 1319-1327.

研究業績一覧

1. 査読付き論文

- (1) Kurosawa, M., Sasaki, T., Usami, Y., Kato, S., Sakaki, A., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. (2021). Neural networks integrated circuit with switchable gait pattern for insect-type microrobot. *Artificial Life and Robotics*, 26(3), 297-303.
- (2) Sasaki, T., Kurosawa, M., Usami, Y., Kato, S., Sakaki, A., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. (2021). Development of neural networks chip generating driving waveform for electrostatic motor. *Artificial Life and Robotics*, 26(2), 222-227.
- (3) Takei, Y., Morishita, K., Tazawa, R., Katsuya, K., & Saito, K. (2021). Non-programmed gait generation of quadruped robot using pulse-type hardware neuron models. *Artificial Life and Robotics*, 26(1), 109-115.
- (4) Morishita, K., Takei, Y., & Saito, K. (2020). Design of hardware-based biomimetic neural networks exhibiting oscillatory burst firing of lamprey nervous system. *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*, 13, E20-007-1-E20-007-4.
- (5) Sasaki, T., Kurosawa, M., Ohara, M., Hayakawa, Y., Noguchi, D., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. Development of hardware neural networks generating driving waveform for electrostatic actuator. *Artificial Life and Robotics*, 25(3), 446-452.

2. 著書

- (1) Takei, Y., Morishita, K., & Saito, K. (2021). *Quadruped Robots with Bio-Inspired Gait Generation Methods Using Sole Pressure Sensory Feedback*.

Handbook of Research on New Investigations in Artificial Life, AI, and Machine Learning, IGI Global. (in press)

(2) Morishita, K., Kato, S., Takei, Y., & Saito, K. (2021). Development of a Receptor Cell Model for an Artificial Life. Handbook of Research on New Investigations in Artificial Life, AI, and Machine Learning, IGI Global. (in press)

(3) Takei, Y., Morishita, K., Tazawa, R., & Saito, K. (2021). Active Gaits Generation of Quadruped Robot Using Pulse-Type Hardware Neuron Models, Biomimetics, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.95760.

3. 国際会議における発表

(1) Takei, Y., Tazawa, R., Kaimai, T., Morishita, K., & Saito, K. (2021). Dynamic simulation of non-programmed gait generation of quadruped robot. In The Twenty-Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2021 (AROB 26th 2021).

(2) Morishita, K., Kato, S., Sasaki, T., Takei, Y., & Saito, K. (2021). Development of receptor cell model converting sensor inputs into pulse waveforms. In The Twenty-Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2021 (AROB 26th 2021).

(3) Takei, Y., Morishita, K., Tazawa, R., Katsuya, K., & Saito, K. (2020). Non-programmed gait generation of quadruped robot using pulse-type hardware neuron models. In The Twenty-Fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (AROB 25th 2020).

(4) Sasaki, T., Kurosawa, M., Usami, Y., Kato, S., Sakaki, A., Ohara, M., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. (2020). Development of neural networks chip generating driving waveform for electrostatic motor. In The

Twenty-Fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (AROB 25th 2020).

(5) Kurosawa, M., Sasaki, T., Usami, Y., Kato, S., Sakaki, A., Ohara, M., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. (2020). Neural networks integrated circuit with switchable gait pattern for insect type microrobot. In The Twenty-Fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (AROB 25th 2020).

(6) Mizumoto, A., Ishikawa, M., Ito, H., Yamada, N., Osada, G., Hirao, S., Takei, Y., Kaneko, M., Uchikoba, F., & Saito, K. (2020). Simplification of leg mechanism using lever crank for insect-type MEMS microrobot. In The Twenty-Fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (AROB 25th 2020).

4. 国内学会における発表

(1) 有馬明日香, 松本卓才, 森下克幸, 武井裕樹, 小林伸彰, 齊藤健. (2021). 音声課題に対する脳波のフラクタル次元変化を用いた集中力の解析手法に対する検討. 第 34 回 回路とシステムワークショップ.

(2) 高柳拓生, 宇佐見雄, 加藤真也, 榊亜理沙, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 四足歩行ロボットに搭載する自己回帰を持つニューロモフィック回路の集積化に対する検討. 第 34 回 回路とシステムワークショップ.

(3) 榎澤瑠奈, 高柳拓生, 宇佐見雄, 加藤真也, 榊亜理沙, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 静電モータ駆動のマイクロロボットの歩行パターンが生成可能なニューラルネットワーク集積回路の開発. 第 34 回 回路とシステムワークショップ.

(4) 古屋堇, 伊藤穂高, 石川真聡, 山田哲之, 森下克幸, 武井裕樹, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2021). MEMS マイクロロボットに用いる剣形脚

部の検討. 第 38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム.

(5) 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 非ノイマン型のニューロデバイスを実装したロボットシステムの開発. 令和 3 年電気学会全国大会.

(6) 榎澤瑠奈, 伊藤穂高, 石川真聡, 山田哲之, 長田元気, 水本明日也, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 昆虫型マイクロロボットの駆動に必要な静電モータの出力に対する検討. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会.

(7) 有馬明日香, 松本卓才, 林昂志, 高橋玄記, 森下克幸, 武井裕樹, 小林伸彰, 齊藤健. 脳波のフラクタル次元を用いた注意力の解析手法に対する検討. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会.

(8) 高柳拓生, 榊亜理沙, 宇佐見雄, 加藤真也, 佐々木拓郎, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 静電モータで動作するマイクロロボットの駆動波形を生成するニューラルネットワークの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会.

(9) 古屋董, 伊藤穂高, 石川真聡, 山田哲之, 長田元気, 水本明日也, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. てこクランク機構を用いたマイクロロボット用脚部の回転部品に対する検討. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会.

(10) 森下克幸, 宇佐見雄, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 広い発火範囲を持つパルス形ハードウェアニューロンモデルの検討. 電気学会電子回路研究会

(11) 山田哲之, 石川真聡, 伊藤穂高, 長田元気, 水本明日也, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2021). 昆虫型マイクロロボット用静電モータの開発. 第 11 回集積化 MEMS 技術研究ワークショップ.

(12) 加藤真也, 宇佐見雄, 榊亜理沙, 佐々木拓郎, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). センサ入力に応答する受容細胞モデルの集積回路化に対する検討. 電気学会電子回路研究会.

- (13) 森下克幸, 加藤真也, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). センサ入力強度に応じたパルス波形を出力する受容細胞モデルの開発. 電気学会電子回路研究会.
- (14) 宇佐見雄, 星野太輝, 黒澤実花, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). 階層型ハードウェアニューラルネットワークの構成要素の周波数特性に対する検討. 電気学会電子回路研究会.
- (15) 榊亜理沙, 宇佐見雄, 加藤真也, 黒澤実花, 森下克幸, 佐々木拓郎, 武井裕樹, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2020). 静電モータで駆動する昆虫型マイクロロボットの歩行パターンを生成するニューラルネットワーク集積回路の開発. 電気学会電子回路研究会.
- (16) 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). ヤツメウナギの遊泳に係る神経系を模倣したハードウェアニューラルネットワークモデルの設計. 電気学会電子回路研究会.
- (17) 開米拓実, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). 伸筋と屈筋によって動作する昆虫型ロボットの脚の設計. 電気学会電子回路研究会.
- (18) 勝谷孝一, 田澤陸, 森下克幸, 冨増優樹, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). ニューロモーフィック回路を用いた魚型ロボットシステムの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.
- (19) 榊亜理沙, 宇佐見雄, 加藤真也, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). マイクロロボット用の静電アクチュエータの駆動波形を出力するニューラルネットワーク集積回路の基礎的検討. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.
- (20) 松本卓才, 林昂志, 高橋玄記, 武井裕樹, 齊藤健. (2020). 音刺激を用いた脳波信号によるロボット制御の基礎的検討. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.
- (21) 加藤真也, 宇佐見雄, 榊亜理沙, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 四足歩行ロボットに搭載する集積化ニューロモー

フィック回路の出力測定. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.

(22) 石川真聡, 伊藤穂高, 山田哲之, 長田元気, 水本明日也, 平尾聡志, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 昆虫型マイクロロボット用の静電センサの基礎的検討. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.

(23) 山田哲之, 伊藤穂高, 石川真聡, 長田元気, 水本明日也, 平尾聡志, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). マイクロロボット駆動用静電モータの小型化に対する検討. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.

(24) 宇佐見雄, 加藤真也, 榑亜理紗, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 歩行パターンの切り替え可能な 6 脚マイクロロボット用ニューラルネットワーク集積回路の開発. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.

(25) 伊藤穂高, 石川真聡, 山田哲之, 長田元気, 水本明日也, 平尾聡志, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). MEMS マイクロロボット用のでこクランク機構を用いた脚部の作製. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会

(26) 山口貴大, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 昆虫型ロボットに搭載する中枢パターン生成器モデルの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会第 25 回研究発表会.

(27) 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). ヤツメウナギの神経系を模倣したヤツメウナギアナログ神経回路モデルの開発. 第 34 回エレクトロニクス実装学会春期講演大会.

(28) 加藤真也, 宇佐見雄, 榑亜理沙, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 四足歩行ロボットに実装するニューロモーフィック回路の集積化に対する検討. 電子回路研究会.

(29) 榑亜理沙, 宇佐見雄, 加藤真也, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). マイクロロボット用の静電アクチュエータを駆動するニューラルネットワーク集積回路の基礎的検討. 電子回路研究会.

- (30) 田澤陸, 勝谷孝一, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 馬の歩容を生成するニューロモーフィック回路の小型化に対する検討. 電子回路研究会.
- (31) 山口貴大, 森下克幸, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 昆虫の脚の動作を模倣可能な中枢パターン生成器モデルの開発. 電子回路研究会.
- (32) 宇佐見雄, 黒澤実花, 佐々木拓郎, 森下克幸, 小原正也, 武井裕樹, 齊藤健. (2019). 階層型のパルス形ハードウェアニューラルネットワークに対する検討. 電子回路研究会.
- (33) 武井裕樹, 森下克幸, 田澤陸, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2019). 独立したニューロ回路の実装により動物に似た歩容を生成する四足歩行ロボットの開発. 第 32 回 回路とシステムワークショップ.
- (34) 武井裕樹, 冨増優樹, 田澤陸, 森下克幸, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2019). ニューロ回路の搭載により生物の歩容を発現する四足歩行ロボットの開発. JPCA2019 アカデミックプラザ.
- (35) 冨増優樹, 武井裕樹, 田澤陸, 森下克幸, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2019). 自己回帰を持つニューラル回路を実装した 4 足歩行ロボットの自発的な歩容の生成. 第 33 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会.
- (36) 田澤陸, 森下克幸, 冨増優樹, 武井裕樹, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2019). ニューロ回路を用いて自発的に足並みを変化させる四足歩行ロボットの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会第 24 回研究発表会.
- (37) 森下克幸, 田澤陸, 冨増優樹, 武井裕樹, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健. (2019). 4 足歩行ロボットの歩行速度を変化させるハードウェア CPG モデルの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会第 24 回研究発表会.