

論文の内容の要旨

氏名：武田 健嗣

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：脳幹脊髄投射系を模倣した人工神経回路網による人間の歩容制御信号の生成と切替に関する研究

内閣府は、様々な社会課題を解決し人々の幸福の実現を目指して Society5.0 とムーンショット目標を掲げた。人々の幸福を実現するために、人間に代わる新たな労働力となるロボットが求められている。なかでも、人間の労働力と成り得るロボットとして、人型の2足歩行ロボットが注目されている。2足歩行ロボットは多様な方法で研究されているが、人間とは異なった独自の制御方法によって実現されてきたため、それに伴った課題も浮き彫りとなった。2足歩行ロボットを含め、ロボットの知能系と運動系は、主にCPUとソフトウェアプログラムの組み合わせによって制御される。人間や動物と同等の運動が可能なロボットも実現されているが、膨大な数値計算を必要とするため複雑な運動に特化した制御システムとなっている。この制御システムでは、センサの数を増やすことで周辺環境を正確に把握し、不整地などを移動するために状況に合わせてアクチュエータを正確に制御する必要がある。アクチュエータを正確に制御するためには、多くのセンサからのフィードバック情報、複雑な制御プログラムを必要とするため、運動の生成までに膨大な情報を高速かつ正確に処理する必要がある。従って、消費電力を犠牲に高性能なCPUを用いた制御システムが必要になるという課題が発生する。

2足歩行ロボットの運動制御に関する課題を解決するために、生体の優れた神経系の機能に着目し、機能の解明や2足歩行制御へ利用する研究が行われている。人間の身体構造や神経系を模倣し、歩行と走行の制御方法や神経系に基づくシステムが提案されてきた。しかしながら、その神経機能や神経信号の具体的な推定はまだ明らかにされていない。また、従来の研究では人間の歩容に関する神経機能や神経信号の再現には、数理モデルを用いた手法が主流となっている。また、生体が生成する非線形な神経信号を数理モデルによって再現するのは、前述したロボットの制御システムと同様に膨大な計算処理が可能な高性能なCPUを必要とする。一方で、電子回路を用いたハードウェアモデルによる人間の歩容に関する神経機能や神経信号の再現に関する試みは少ない。

以上から、本研究では数値計算に依らずに生体の神経回路網に近い2足歩行制御用の運動制御手法を新たに提案し、歩行制御信号の生成と切替を行う脳幹脊髄投射系の機能を模倣したアナログ電子回路を用いた人工神経回路網の実現を目的とした。

本論文は、全10章で構成されており、以降に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、前述のように、研究の背景と2足歩行制御に対する問題点を明らかにし、本研究の位置づけ及び目的を述べた。

第2章「脊椎動物の神経系と運動制御」では、本研究で提案する人工神経回路網の下地となる生理学的知見について述べた。人間の脊髄の機能に着目し、歩行と走行を制御する歩容制御信号の生成や切替を行う神経系について述べた。

第3章「ハードウェアニューラルネットワーク」では、本研究で提案する人工神経回路網の下地となるハードウェアニューラルネットワークについて述べた。

第4章「筋骨格モデルを用いた機械的アクチュエータパラメータの抽出と筋シナジー理論との対応」では、筋骨格モデルを用いて筋の機械的パラメータを抽出し、筋シナジー理論で示された歩行と走行の筋電位を対応させた。その結果、筋電位の活動度と抽出した機械的パラメータの時系列の変化で最大となるタイミングが重なることが示された。収縮変位に着目すると、歩行と走行の歩行周期において、時系列で繰り返す6つのタイミングで筋群を分類できることが示された。6つのタイミングにおいて、歩行の3つ目のタイミングと走行の2つ目のタイミングにおいて、動作する筋に差異が見られた。従って、歩行を制御する場合は、6つのタイミングの内、3つ目を遅いタイミングとして、1, 3, 4, 5, 6の各タイミングで対応した筋群を動作させる。走行を制御する場合は、6つのタイミングの内、2つ目を早いタイミングとして、1, 2, 4, 5, 6の各タイミングで対応した筋群を動作させる。6つのタイミングの内、2つ目と3つ目を切替え、5つの時系列のタイミングとすることで歩行と走行を制御できる可能性を示した。この5つの時系列のタイミングを5章以降で示す人工神経回路網が生成する神経信号パターンの指標とした。

第5章「2足歩行制御用ハードウェア CPG モデルによる歩容制御信号の生成と切替」では、生理学的知見、4章で示した結果から、歩行と走行を制御する5つの時系列タイミングをパルスパターンとして生成、切替を行う人工神経回路網を提案した。提案したモデルは、歩行と走行を制御するといわれる脊髄の中樞パターン生成器 (Central pattern generator : CPG) を想定したモデルとした。CPGモデルは、4章で示した6つの時系列のタイミングをパルスパターンとして生成する基本回路部と、2つ目と3つ目のパルスを切替えるシナプス回路部で構成した。提案したモデルは6つの出力ポート $v_1 \sim v_6$ を設置した。歩行を制御する時系列パルスパターンを生成するには、CPGモデルから3つ目のパルスを遅いタイミングとして、 v_1, v_3, v_4, v_5, v_6 を出力し5つの時系列パルスパターンとする。走行を制御する時系列パルスパターンを生成するには、CPGモデルから2つ目のパルスを早いタイミングとして、 v_1, v_2, v_4, v_5, v_6 を出力し5つの時系列パルスパターンとする。従って、歩行と走行を制御する5つの時系列パルスパターンの生成と切替を、回路シミュレーション及び、ディスクリート素子回路による実測から示した。このとき、歩行パターンと走行パターンの歩行周期は、約1.0sとなった。回路定数が共通であるため、同じ歩行周期として生成された。

第6章「脳幹脊髄投射系を付加したハードウェア CPG モデルによる歩容制御信号の生成と切替」では、5章のモデルに脳幹脊髄投射系を付加したモデルを提案した。5章では、単純な電圧入力から歩行と走行の切替をしており、生体のように脳幹へ入力される信号から歩容の切替は再現できていなかった。6章では、脳幹脊髄投射系の機能を再現した回路を CPG モデルへ組み込み、電圧パルスの入力から歩行と走行を制御する5つの時系列パルスパターンの生成と切替を実現した。脳幹の中脳歩行誘発野へ上位中枢から入力される信号の違いにより、歩行と走行が切り替わることが生理学的知見から示されている。そこで、上位中枢に見立てた電圧パルスの入力により動作するシナプス回路を作製し、5章の CPG モデルへ組み込んだ。初期状態を歩行していることとし、電圧パルスが入力されていない状態では歩行パターンを生成した。そして、電圧パルスの入力から走行パターンへ切り替わることを回路シミュレーション及び、ディスクリート素子回路による実測から示した。歩行パターンと走行パターンの歩行周期は、約1.1sとなった。

第7章から9章は、第5章と6章を発展させた内容となる。以下、各章について述べる。

第7章「2足歩行制御用ハードウェア CPG モデルの集積回路化」では、5章と6章で示した CPG モデルの集積回路化を検討した。まず、歩行と走行パターンの元となるパルスパターンを出力する基本回路部の集積化を行った。次に、5章と6章では再現できていなかった歩行周期の変化に着目した。パルスパターンの周期の変化が可能な基本回路部の回路構成を提案し、集積回路化についても検討した。基本回路部が生成したパルスパターンの周期は、約1.2s から約0.9s に変化することを確認した。また、本章で検討した集積回路はシミュレーションまでを行った。

第 8 章「歩容と歩行周期の変化を同時に可能とするハードウェア CPG モデル」では、6 章のモデルをベースに、より人間の脳幹脊髄投射系に近づけたモデルを提案した。5 章と 6 章では歩行と走行の切替を行い、7 章では歩行周期の変化について示した。しかし、歩容と歩行周期を同時に変化させることはできていなかった。また、パルスパターンを時系列順に出力するために、トリガーパルスを入力してマニュアルで行っていた。第 8 章では、脳幹脊髄投射系における歩容と歩行周期を同時に変化させることを再現した。また、パルスパターンの出力順を自動的に行える回路構成を提案し時系列順に出力できることを回路シミュレーション及び、ディスクリート素子回路による実測から示した。歩行パターンの歩行周期は、約 1.04s となった。また、走行パターンの歩行周期は約 0.77s となった。走行パターンに切り替わる際、歩行周期が同時に短くなることを確認した。

第 9 章「センサ入力により脊髄の反射機能を促すハードウェア CPG モデル」では、5 章から 8 章で示した CPG モデルへ反射機能を付加するため、その前段階として以前提案した、マイクロロボット用の集積回路化した CPG モデルを用いて、センサ入力により反射機能を促すモデルを検討した。CPG モデルに取り付けたセンサによって、センサ入力が持続されると歩容パルスパターンを形成するパルス幅が変化することを確認した。

第 10 章「結論」では、各章の結論と本研究の結論を述べた。

本研究では、現行の 2 足歩行ロボットの運動制御システムの問題点を明らかにし、それに代わる新しいシステムの提案として、パルス形ハードウェアニューラルネットワークを用いて、人間の歩容制御信号の生成と切替を行う脳幹脊髄投射系の機能を模倣した人工神経回路網を示した。

本研究を通して、従来のデジタル的なロボットの運動制御とは異なる、生体の神経回路網に類似したアナログ電子回路を用いた人工神経回路網を検討した。なかでも、人間の歩行と走行に関わる脳幹脊髄投射系を中心に、パルス形ハードウェアニューラルネットワークによって歩容を制御する神経信号の生成、切替、歩行周期の変化が可能であることを明らかにした。神経信号を模倣するにあたり、人型筋骨格モデルを用いて、筋の機械的アクチュエータパラメータの特性と筋シナジーで示された筋電位との対応を考察し、5 つの信号との関係性を明らかにした。また、センサを付加したハードウェア CPG モデルにより屈曲反射のメカニズムを再現し、歩行や走行などの運動中に屈曲反射による補助が可能であることを明らかにした。