

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 内木場 文 男

（副査） 教授 齊 藤 健 教授 羽多野 正 俊

教授 佐 伯 勝 敏

第5期科学技術基本計画において我が国が目指すべき未来社会の姿として、『サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）』すなわち、Society 5.0が示され、その実現にはロボットが大きな役割を担うとされている。ロボットはもともと人間を模倣し、人間の代わりにすることを起点としているが、現状では、特定の機能に特化した分野で発展を遂げ、必ずしも人間を模倣しない。また、一般的に、ロボットの制御はマイクロプロセッサとソフトウェアの組み合わせによる演算を介して行われる。駆動にはサーボモータを使用し、回転により運動を作り出す。つまり、現行の理学・工学を組み合わせ、応用することによって得られた一つの形であり、もはや、脳、脊髄による神経、筋肉による駆動系を持つ人間を手本としているとは言い難くなっている。

人間と同程度の大きさのロボットでは制御と駆動系を合わせると1000W程度の電力が消費される。また、駆動系を含む機構部材は主に金属であり、重量超過の主因となる。一方、人間では脳が担当する知能も含めて、消費エネルギーを電力換算すると20W程度にとどまる。さらに、ロボットでは実現できないような多様な機能を状況に応じて柔軟に獲得していく。マイクロプロセッサの能力の向上と膨大なプログラムの適用がロボット分野のこれまでの基盤技術となっているが、手本となった人間の消費電力、重量、柔軟性を再考すると、改めて従来の方法によらず、どのようにしてより人間に近づけるかという課題に突き当たる。

本論文の提出者は現行のロボットの延長ではない新たな提案をして、より人間に近いものを再現するという立場をとった。具体的には、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。とくに、人間の歩行と走行に関わる脳幹脊髄投射系を対象に、パルス形ハードウェアニューラルネットワークを適用することによって、ソフトウェアプログラムによる計算を用いることなく歩容を制御する神経信号の生成、切替が可能であることを示した。また、従来のロボットに用いられているサーボモータによる回転系ではなく、実際の人間に近い人型筋骨格モデルを対象にした。筋の機械的アクチュエータパラメータの特性と筋肉の協調作用を記述する筋シナジー理論で示された筋電位との対応を考察し、解剖学的・生理学的知見を組み合わせ、歩行と走行に係る脳幹脊髄投射系の神経信号を整理した。5つの時系列パルスの繰り返しの中で、パルスタイミングとパルス周期が変化することによって歩行と走行を切替えることができ、実際に電子回路による人工神経回路網を開発・設計し、人工的に脳幹脊髄投射系を創出した。加えて、センサ入力を付加し、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忌避行動が可能になるモデルも提案した。

本論文は全10章から構成されており、以降に各章の概要を述べる。

第1章の『序論』では、ロボットが社会に与える重要性とともに、2足歩行制御で直面する課題が提示された。この課題に対する様々な先行事例を踏まえ、本研究の学術的位置づけとともに目的が示された。

第2章の『脊椎動物の神経系と運動制御』では、神経組織、脊髄の機能、中枢パターン生成器（CPG）、脳幹脊髄投射系、筋電位と神経信号、筋シナジー理論が取り上げられた。また、神経信号を理学・工学

的に取り扱う基礎となった Hodgkin-Huxley 方程式を扱い、本研究の基本となる生理学的知見が整理された。

第3章の『ハードウェアニューラルネットワーク』では、Hodgkin-Huxley 方程式を端緒として発展した人工神経回路網について、とくに、電子回路で構成されるハードウェアニューラルネットワークが整理された。基本要素になる細胞体モデル、シナプスモデル、また、これらを組み合わせるハードウェアニューラルネットワークについて、回路の特徴と機能がまとめられ、本研究で提案する人工神経回路網の下地が提示された。

第4章の『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、人型筋骨格モデルに動力学シミュレーションが適用され、歩行時・走行時それぞれの場合で、筋のアクチュエータとしての時系列パラメータが抽出された。このパラメータを筋シナジー理論で示す筋電位と対応させることによって、歩行時には5つの時系列パルスのうち2つ目のパルスのタイミングが1パルス分遅くなり、走行時には2つ目のパルスのタイミングが歩行時に比べて1パルス分早くなること、また、歩行時の周期に比べ走行時の周期が短くなることが示された。

第5章の『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、2章、3章、4章で整理された知見をもとに実際に提出者が考案した歩行・走行の切替を行う歩容制御モデルが提示された。まず、CPG モデルで6つの時系列パルスを繰り返し生成し、2つ目と3つ目のパルスを消去するシナプス回路を追加することによって、歩行・走行に対応するパルスタイミングの違う5つの時系列パルスを取得できることが示された。電子回路シミュレータを用い回路を設計し、また、ディスクリート素子回路を製作し、歩容制御信号の生成と切替ができることが実際に示された。

第6章の『脳幹脊髓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、脳幹脊髓投射系が追加されたモデルが提示された。生体での歩行と走行の切替は脳幹からのパルス信号の伝搬による脳幹脊髓投射系によるが、5章の歩行と走行の切替は、直流電圧印加によるトリガーに依存している。6章では、脳幹脊髓投射系の機能を再現した積分回路を組み込み、パルスの伝搬入力に応じて歩行・走行を制御する時系列パルスパターンの切替を示した。

第7章の『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章で示された回路モデルの集積回路化が検討された。5章と6章では歩行時と走行時の時系列パルスパターンの切替は実現したが、それぞれの周期は一定のままであった。この章では、5章で示された回路の発振間隔を可変にする構成が提案され、歩行時には1.2秒の周期が走行時には0.9秒に短縮できることが確認された。

第8章の『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、パルスタイミングと周期を同時に変化させるモデルが提案された。また、7章までのモデルでは基本となる6つの時系列パルスの発生順序は初期に外部からのトリガーを入力することで決めていたが、意図した順番で自動的に発信を促す回路が付加された。このモデルは、実際の脳幹脊髓投射系により近づいたことに対応し、回路シミュレーションと実際のディスクリート素子回路で機能することが示された。

第9章の『センサ入力により脊髓の反射機能を促すハードウェア CPG モデル』では、CPG モデルに反射機能を付加する方法が提案された。CPG モデルを一部変更してセンサからの電圧を読み取り、時系列パルスの発振タイミングを遅延させることが示された。このことは、屈曲反射によって足踏みを一時停止するなどの脊髓反射への展開が見込まれる。

第10章の『結論』では、各章の結論と本研究の結論が示された。現行のロボットの運動制御システムの課題に対して、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歩容制御信号の生成と切替を行う脳幹脊髓投射系の機能を模倣した人工神経回路網が提示された。このことにより、従来の方法によらない独自の方法によって、より省電力化とより人間に近い柔軟性をあわせ持つロボットへとつなぐ可能性を示したと論じられた。

以上を要約すると、現行のロボットの運動制御システムの問題点を示し、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、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。2足歩行ロボットの分野において、消費電力、重量のボトルネックを解消でき、人間と同じような多彩な機能を発現するロボットに発展させる一つの入り口を示したことになる。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5年2月16日