

氏名	羽部 安史
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博理工第 653 号
学位授与年月日	令和 2 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	筋駆動型 4 脚モデルの歩行運動のための神経系モデルの提案
審査会	委員長 森 善一 委員 近藤 良 委員 福岡 泰宏 委員 木村 浩

## 論文内容の要旨

本研究では、筋駆動型脚機構を持つ生物規範型4脚ロボットのための歩行運動コントローラの構築を研究目標としている。本研究で目指すコントローラは、動物が実際に持っている運動リズムを生成する神経回路Central Pattern Generator (CPG) を数理モデル化したものをベースとする。CPGは上位中枢からの入力を受けることで歩行や咀嚼というリズムカルな運動を引き起こす神経回路である。これまで多くの研究者によって、CPGを用いた様々な4脚ロボットが開発され、歩行運動を達成している。これらのCPGを搭載した4脚ロボットは、センサによる感覚情報をフィードバックとして受け取ることで、1脚における脚接地時間：非接地時間の割合や4脚間位相差を自律的に調整することができるため、脚軌道を大きく変更することなく不整地を安定して歩行することができた。ところが、これらのロボットのほとんどは、必要最小限の自由度で安定した歩行を達成するために、シンプルな構成であった。例えば、1脚は2関節以下で構成されており、関節はピッチ軸にのみ動く。また、1つの関節を1つのアクチュエータ（例えば電磁モータや直動アクチュエータ）によって駆動するシンプルな脚構造をしていた。そのため、それらの関節を駆動するCPGベースのコントローラも比較的シンプルなもので十分であった。

一方、動物は、多関節からなる脚を複雑な筋構成で駆動することで、エネルギー効率や瞬発力などに優れた歩行を可能にしている。そこで、そのようなより現実的な脚機構を人工筋肉アクチュエータで駆動する4脚ロボットの開発が将来見込まれ、現時点でもいくつか開発されてきている。しかしながら、筋肉は能動的には収縮しか出来ないために1関節駆動のためには対となる主動筋と拮抗筋で収縮しあう必要がある。また、複数の関節にまたがる多関節筋が存在するなど、動物の脚は複雑な筋構成をしており、それら複数の筋肉を適切なタイミングで協調させて駆動するには工夫が必要である。そのために、動物は2階層CPGと呼ばれるより現実的な構成のCPGを使っていると神経工学において指摘されている。

そこで、本論文では、筆者らの開発した2階層CPGをベースとしたコントローラを使用して、シミュレーション上に構築したネコの4脚モデルを歩行させ、実際のネコに似た動作・運動が再現できるかどうかを検証することにした。使用したネコ4脚モデルは、各脚がピッチ軸回りに回転する3関節を持っており、2関節筋を含む6つの筋肉モデルによって駆動される。脚部以外に関節は持っておらず、合計12関節で構成される。各脚の駆動には、2階層CPGを中核としたコントローラを用いる。このCPGは、リズム生成層とパターン形成層の2層からなり、リズム生成層は基本的な脚振動のリズムを生成し、パターン形成層は動物に観察される4つの脚相（遊脚相、接地相、支持脚相、離昇相）において、複数の筋肉モデルを異なる組み合わせで協調的に活動させる。CPGの出力はパターン形成層から出され、その出力はそれぞれの筋肉モデルに対応する運動ニューロンへ入力される。筋肉モデルはそれぞれの運動ニューロンの活性度に応じて出力を変える。また、感覚器官からの求心性フィードバックとして、脚にかかる負荷情報をもとにした脚負荷フィードバックと筋肉モデルの伸張情報をもとにしたIaフィードバックを持つ。

これまでに、このようなより現実的な筋駆動型脚と神経系モデルから構成された歩行モデルはいくつか存在するが、それらは前2脚もしくは後ろ2脚であり、さらに運動が平面（矢状面内）に限定されていた。しかし、本研究では、拘束のない3次元空間でネコを規範としたモデルの4脚歩行を達成し、さらに、その脚軌道や運動ニューロンの活動は実際のネコと類似することを示した。また、いくつかのパラメータを変更することで様々な速度での移動もすることができた。加えて、パラメータを変更することなく登坂、段差の乗り越え、摂動への適応をすることができた。現実的な筋駆動型脚と神経系モデルを持つ4脚モデルが、3次元空間での安定した歩行が達成できた要因として、次の4つ要素が重要だったと考えている。(1) シンプルなパターン形成層の構成でありながら、前述した4つの脚相を適切な脚軌道で再現したこと。(2) 筋肉モデルの受動弾性成分の適切な設定

により、脚軌道生成を簡略化したこと。(3) CPGへの脚負荷情報フィードバックを介した4脚間位相差の自律的な調整により胴体のロール運動が安定化したこと。(4) 実数値遺伝的アルゴリズムを含むパラメータ調整により、多数のパラメータの調整を容易にしたこと。以上4つの要素を適切に統合したことで、これまで困難であった、現実的な筋駆動型脚と神経系モデルを持つ4脚モデルの3次元空間での安定歩行を達成することが出来た。

また、上位中枢から離断されたネコの後脚による実験において、上位中枢からの下降性信号の強度を変えなく、速度が変化するトレッドミルに適応して歩いたという報告をもとに、同様の環境をシミュレーション上に構築し、本研究で提案するコントローラがネコの後脚実験と同様の結果を得られるかを検証した。先述の4脚モデルの前脚を能動的に駆動する車輪に置き換え、この能動車輪によって牽引するモデルをネコ後脚モデルとした。このシミュレーション中はネコ後脚モデルのパラメータを一切変えなく、歩行開始から能動車輪の速度を徐々に上昇させたところ、ネコ後脚モデルは能動車輪の速度に自律的に適応して歩行速度を上昇させる事ができた。この自律速度適応において、ネコ後脚モデルの歩幅や脚振動周期の変化が実際のネコの実験に一致していたことから、提案する神経モデルが妥当なモデルであることを示唆している。

さらに、提案したコントローラが実際のロボットで期待通りの挙動を示せるかを確認するために、ネコの後ろ2脚を模したロボットに提案するコントローラを実装した。このロボットは、シミュレーション上のネコ後脚モデルの2脚をベースに実機化したもので、各脚は3関節6人工筋肉を有し、アクチュエータには空気圧式人工筋肉を用いている。ネコ後脚モデルのシミュレーション同様に、外力に対するコントローラの適応性を確認するために、後脚ロボットはトレッドミルの任意の位置にとどまるように胴体を固定している。これにより、ロボットの後脚はトレッドミルの速度変化に応じた影響を受ける。この結果、トレッドミルの速度に対する脚運動周期の変化が実際のネコと非常によく似ていた。この実験結果から、提案するコントローラは、実際の動物が持つ挙動を実際のロボットでも再現することが出来ることがわかった。

以上の、ネコの4脚モデルやネコ後脚モデルのシミュレーションおよび後脚ロボットの結果から、本研究で提案するコントローラは生物が持つ神経系の特性を再現できていると考えられ、安定した歩行や外乱への適応を期待できることから、筋駆動型の生物規範4脚ロボットの歩行運動に有用であると考えている。

## 論文審査の結果の要旨

### (1) 学術論文の判定

当審査会は、本論文を茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程における博士（工学）の学位審査基準を充たし、合格であると判定する。

### (2) 判定理由

学位申請者は、学術性、有用性において重要な成果を学位論文としてまとめている。また、本論文の主要な成果を学術誌論文1編に第一著者として報告し、国際学会においても1度発表を行っている。

以下、本論文の独創性、および学術性・有用性に関して貢献していると判断した成果について説明する。過去にも、4脚動物の歩行運動を生成する神経系の数理モデルを構築することを目指して、脚の筋肉を制御する神経系モデルを提案する研究はロボット工学、神経工学分野においていくつか存在していた。しかし、それらの神経系モデルを用いてコンピュータシミュレーション上で実現されたのは、いずれも前2脚、もしくは後2脚のみの半身動物モデルによる歩行であり、残りの半身は拘束されていた。そのため、2脚での歩行の脚運動軌道は生成されていたが、拘束のない安定な4脚歩行は実現できていない。

そこで、申請者はシミュレーション上において4脚での安定した歩行が実現可能な神経系モデルを提案することを目指した。そのため、4脚でバランスを保つため3つの要素を取り入れた。1つ目の要素は、筋肉の持つ受動特性を活用したことである。歩行中に適切なバランスが保たれる筋肉の釣り合いの位置を設定した。2つ目は、動物の脊髄に存在すると言われる**Central Pattern Generator (CPG)**と呼ばれる神経回路の数理モデルに新たなニューロンモデルを追加したことである。これにより、動物に近い脚軌道と広い歩幅で脚を振れるようになった。3つ目は、CPGへ脚負荷情報をフィードバックすることで自律的に4脚間の振動位相差が調整される神経系を構築したことである。これにより、歩行速度に応じた自律的な歩行パターンの調節、および、バランスを崩したときの4脚間位相差の適切な位相差の調節ができるようになった。また、遺伝的アルゴリズムの導入により、多数の神経パラメータの調節を容易にした。

その結果、従来困難だった4脚での平地歩行だけでなく、段差超えなどの外乱を受けた際も転倒することなく安定した歩行が可能であることをシミュレーション上で証明した。申請者の提案した神経系モデルは筋駆動型ロボットの制御手法として有益であると考えられる。以上の成果は、学位審査基準を十分満たすと判断する。