

学 位 論 文 題 名

A Study on Starfish Robot with Massive SMA Actuators

(多数 SMA アクチュエータを用いたヒトデ型ロボットに関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、生物が持つ柔軟な形態・挙動をロボットの中に実現するための構造設計、アクチュエータ開発、制御法の開発をその研究対象としている。

近年、ロボット工学が扱う諸問題は、多様化、複雑化の様相を呈し、工学的応用のみに限定してきた従来のロボット研究とは異なりより複雑なケースを研究対象とする新たなパラダイム模索の時代に入りつつある。このような対象に対する一つのアプローチとして、柔軟性や適応性といった性質を機械に付与することの可能性がクローズアップされつつある。このような流れの中で、本研究は機械自体が構造的にも情報处理的にも柔軟性を有する機械システムをベースとした次世代のロボット研究の展開を試みたものである。ところで、生物が持つ柔軟性は、筋肉に代表される細胞組織の集合体を持つ性質にその特徴がある。その性質とは、筋肉の緊張弛緩による機械インピーダンスの受動的、能動的変化を指す。この模倣として、本論文では、形状記憶合金（SMA）を採用する。

本論文では SMA をベースとした各々特質を異にする二種類のロボット開発をインスタンスとする。一つは、ヒトデの形態的特徴である五放射相称形状と脳を持たないという情報処理的特長を有している「ヒトデ型」。もう一つは、アメーバのような多細胞性の生物を模倣し、分離結合という構造的特徴と独立した情報処理機構の集合体から環境適応的行動生成が可能な「トライポッド型」である。

ヒトデ型のモデル対象であるヒトデは、頭、脳を持たず、体節性も認められない。また、ヒトデの形態は、五方向への放射相称であり、腕の内部構造も五放射相称である。ヒトデの腕は多数のアクチュエータ群と関節から構成し、腕の拮抗筋骨格構造と階層型構造を持つ形状記憶合金群から構築し、その制御は外部温度制御によりこれを行い、結果として柔軟性と剛性の両方が実現される。ところで、ヒトデが持つ神経系はニューロンリングと呼ばれる複数の意思決定主体による相互結合ネットワークにより構成されている。本研究ではネットワークのノードを自律的意思決定主体であるエージェントと捉え、それらのエージェントのネットワークを適応学習させることにより、タスク達成のための運動生成を実現している。

一方、トライポッド型は、細胞の分離結合により、全体形状が変化する細胞性アメーバ様の生物の持つ自在変形機能をモデルとしている。人工的に、一個のアメーバー細胞はユニットと呼ばれる正三角形を基本形状とし、その頂点間に形状記憶合金を配した形状記憶合金の動作により、頂点が歪み形状変形が実現されるような構造から構成される。このユニットを連結させることにより、様々な形態を構築することが可能となる。それぞれのユニットには、ヒトデ型同様にエージェントが実装されており、原始的な生体の自在変形運動制御の機序を具現化している。

本論文は、上述の二つのモデルについて、構造的（五放射相称，自在変形能），情報処理的（分散システム），材料的（SMA アクチュエータ）柔軟性を有するロボットとして設計試作し，実環境下における実機動作実験と，シミュレーションにより，種々のデータを収集分析し，構築したロボットの特徴に関する議論を通して，柔軟ロボット設計への可能性をも議論した結果をまとめたものである。

本論文は，7章から構成されており，以下に概略を示す。

第1章は，本論文の構成，研究の背景，研究の目的について述べている。

第2章は，ヒトデ型ロボットの設計について論じている．初めに，モデル化の対象となるヒトデの生態学，解剖学的性質をまとめ，設計方針として構造的，情報処理的，材料的柔軟性について論じている．さらに，ロボットの構成要素として SMA アクチュエータ，腕ユニット，センサー，コントローラの設計について論じている．また，背景となる関連研究についても論じている．

第3章は，ヒトデ型ロボットの運動を定式化し，実測データを用いて性能を評価している．初めに，SMA アクチュエータ，腕ユニット，ロボット全体の力学的性質を定式化している．次に，SMA アクチュエータの熱特性，弾性特性，機械インピーダンスの計測結果を示している．腕ユニットのデータ計測には，6軸フォーストルクセンサ系を設計し，力特性，トルク特性，機械インピーダンス特性の計測結果を示している．

第4章は，実機の動作実験を行う．初めに，オープンループ系での歩行実験，及び方向センサを用いた走光性歩行実験の結果を示し，その挙動について検証する．次に，ビデオ観測システムを用いた動作計測手法について述べる．次に，ヒトデ型ロボットの解析的な制御の困難性を示す．そこで，アクチュエータに対する制御信号パターンを列挙し，その信号パターンに対するロボットの挙動を分類することによって，合目的な信号パターンを抽出する手法について示している．さらに，アクチュエータの動作とロボット全体の挙動との関連性について議論し，本手法の将来的発展性について考察している．

第5章は，マルチエージェントシステムによるヒトデ型ロボットの制御法について論ずる．初めに，制御構造をマルチエージェントシステムにより定式化している．ここで，エージェントの状態遷移関数をニューラルネットワークにより実装し，その重み係数を進化的計算手法である GA によって獲得する制御法を提案する．次に，この制御法を用いたシミュレーションにおいて，ターゲットトラッキング問題を取上げ，制御性能について検証している．また，腕の数，体幹の形状を楕円にした場合においても同様のシミュレーションを行い，それらの関係について議論している．

第6章は，分離結合を考慮したトライポッド型ロボットを提案し，アクチュエータの基礎的な特性について述べ，将来的な発展性について論ずる．初めに，SMA 曲げアクチュエータを提案し，トライポッド型ユニットの設計を行っている．次にユニットの運動学，動力学を定式化している．また，ユニットのコントローラとしてマイクロコントロールボードを設計製作しユニットに組み込み，ユニット間の無線通信機も実装している．アクチュエータについては，力学的性能，及び周波数応答特性を実測し，断面形状，長さ，加熱量による影響を検証している．動作実験としては，ユニットを1台，2台，3台，10台用いた場合について計測を行い動作特性について検証している．

第7章は，結言であり，本論文の結論として得られた結果を総括している．

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 大 内 東
副 査 教 授 大 森 隆 司
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

A Study on Starfish Robot with Massive SMA Actuators

(多数 SMA アクチュエータを用いたヒトデ型ロボットに関する研究)

本論文は、機能・構造の未分化状態をその特徴とするヒトデ等の生物が持つ柔軟な形態・挙動のアナロジーの工学的実現を目的として行ってきた一連の研究結果をまとめたものである。ところで最近のロボット工学が扱う諸問題は、多様化、複雑化の様相を呈し、ヒューマノイド指向のみならずより複雑なケースを研究対象とする新たなパラダイム模索の時代に入りつつある。このパラダイムの中心をなすのが、より生物に近い材料、機能、形態実現への模索、換言すれば生物の持つ柔軟性、適応性の工学的実現への模索である。このような流れの中で、本論文はスケルトンとしての機械的フレームをその骨格とするようなソフトメカニクス実現のための設計論の提案、および実機製作、実験を通じた提案理論の検証をまとめたものである。ところで、生物が持つ柔軟性は、筋肉に代表される細胞組織の集合体の持つ性質に由来する。その性質とは、筋肉の緊張弛緩による機械インピーダンスの受動的、能動的変化を指す。この模倣として、本論文では、形状記憶合金（SMA）を採用している。さらに生物の持つ構造的柔軟性は制御工学的視点からするとその超多自由度性に起因する。以上の知見の下、本論文では多自由度特性を有する SMA をベースとした各々特質を異にする二種類のロボット開発をそのインスタンスとしている。一つは、ヒトデの形態的特徴である五放射相称形状と脳を持たないという情報処理的特長を有している「ヒトデ型」。もう一つは、アメーバのような多細胞性の生物を模倣し、分離・結合という構造的特徴と独立した情報処理機構の集合体から環境適応的行動生成が可能な「トライポッド型」である。

本論文は、上述の二つのモデルについて、構造的（五放射相称、自在変形能）、情報処理的（分散システム）、材料的（SMA アクチュエータ）柔軟性を有するロボットとして設計試作し、実環境下における実機動作実験と、シミュレーションにより、種々のデータを収集分析し、構築したロボットの特徴に関する議論を通して、柔軟ロボット設計への可能性をも議論した結果をまとめたものである。

本論文は、7章から構成されその概要は以下の通りである。

第1章では特に研究の背景を具体的に眺望している。

第2章は、ヒトデ型ロボットの設計論を展開している。初めに、モデル化の対象となるヒトデの生態学、解剖学的性質をまとめ、設計方針としての構造的、情報处理的、材料的柔軟性について論じている。さらに、ロボットの構成要素としてSMAアクチュエータ、腕ユニット、センサー、コントローラの設計について論じている。第3章は、ヒトデ型ロボットの運動を定式化し、実測データを用いて性能を評価している。すなわちSMAアクチュエータ、腕ユニット、ロボット全体の力学的性質を定式化し、SMAアクチュエータの熱特性、弾性特性、機械インピーダンスの計測結果を示している。腕ユニットのデータ計測には、6軸フォーストルクセンサ系を設計し、力特性、トルク特性、機械インピーダンス特性の計測結果を得ている。これらはソフトメカニクス設計への有益な資料となりうる。第4章では、実機の動作実験をオープンループ系での歩行実験、及び方向センサを用いた走光性歩行実験の結果を示し、その挙動特性について検証している。さらに、ビデオ観測システムを用いた新しい動作計測手法を提案している。これはある種のデータマイニング法とみなすことも出来る。第5章は、超多自由度を持つシステムの制御法としてGAを組み込んだマルチエージェントシステムによる制御法を提案し実機実験を通したその有効性を示している。第6章は、分離結合を考慮したトライポッド型ロボットを提案し、アクチュエータの基礎的な特性について述べ、新規にSMA曲げアクチュエータを提案し、トライポッド型ユニットの設計を行い、ユニットの運動学、動力学を定式化している。さらに、ユニットのコントローラとしてマイクロコントロールボードを新たに設計製作しユニットに組み込み、ユニット間の無線通信機も実装し、ユニットを1台、2台、3台、10台用いた場合について実機実験を行い提案手法の有効性を検証している。第7章では本論分を総括している。

これを要するに、著者はヒトデを模倣した人工物実現のために必須となるSMAをベースとした設計仕様、設計要因をその構造および機能の両面から明らかにし、製作した実機実験を通してその有効性を検証した。さらにこれで得られた知見を下にして、分離・接合機能を併せ持つ同種多細胞型ロボットの設計試作をも行い展開した手法の敷衍性をも示した。これによりソフトメカニクスに関する研究分野において多くの新知見を得たものであり、ロボット工学、情報工学、および複雑系工学分野の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。