

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 松下 光次郎

松下 光次郎(まつした こうじろう) 提出の本論文は「Evolutionary Design for Emergence of Embodiment on Legged Locomotion (進化的設計を用いた脚移動体の身体性機能発現に関する研究)」と題し、全7章よりなり、認知科学の領域において提唱された身体性機能の概念的表現を、脚移動体の問題領域に限定し、物理的表現形に帰着させることを目的として執筆した論文である。

特筆すべき成果としては、本論文で提案した進化設計システムを用いて身体性機能を探索した結果、従来の脚移動体と比べ、高いエネルギー効率を有する新しい準受動歩行機のメカニズムを発見し、これに対する詳しい解析結果が述べられていることである。

本論文は、序章と結論のほか五つの章から構成される。

序章においては、本論文の意義と目的、および、研究背景を解説している。特に研究背景では、認知科学分野およびロボット工学における「身体性機能の概念」の研究動向、および、脚移動体の研究動向について述べられている。

第二章においては、脚移動研究における代表的な脚移動体に注目、それら脚移動体に内在する身体性機能を明らかにするため、同一仮想空間内に同一身体条件(サイズ・重量)を有する3種類の代表的な脚移動体モデル(ZMP制御型・CPG制御型・準受動型)を構築し、挙動解析を行った。その結果、「腰関節トルクの力学特性」・「移動時におけるZMPと支持多角形の軌跡」・「脚移動におけるエネルギー効率」の物理的表現により、脚移動体の身体性を明示し、それらに内在する身体性機能について示されている。ここでの結論として、身体性機能は、「情報処理負荷の低減」と「エネルギー効率の向上」に深く関与しており、脚移動体において、これらの特徴が一般的に観察されることが示されている。

第三章においては、教育エンターテイメント(人間の創作能力を利用するロボット設計)を通じて構築された種々の移動体の中に興味深い身体性機能が含まれることを明らかにした。また教育的エンターテイメントの創作開発環境を明確にするため、教育エンターテイメント活動の意義、「初心者においてもロボットの身体構造と制御系を簡単に製作できる教材」、その教材に基づく「創造的なものづくり教育」の構成方法について述べられている。

第四章においては、脚移動体を9リンク8自由度のリンクメカニズムとして表現し、関節種類、リンク長、質量、軸角度、粘弾性の解空間を探索する方法として、進化的設計システムを提案し、その構成について述べている。ここでは、身体と制御の同時進化のフィットネスランドスケープの様相を示すことで進化的計算手法として遺伝的アルゴリズムを用いた意義を明らかにし、システムアーキテクチャとそのデータ構造が示されている。本論文で示されるシステムの独創性は、アーキテクチャと解の評価手法に集約される。アーキテクチャは、「同時進化アーキテクチャ」と「設計者とのインタラクティブインターフェース」を二段構えに繰り返し結合することにより、広大な解空間の探索との設計者の創作能力を導入する機能を併せ持っている。解の評価手法は第二章で示された身体性機能を探索するために、制約条件として単振動を制御入力とし、適応度関数に単位時間当たりの到達距離を設定することにより、「情報処理負荷の低減」と「エネルギー効率の向上」の両者の特性を解の探索に組み込んでいる。

第五章は、提案された進化的設計システムにより獲得された二脚移動体の挙動解析の結果について述べられてい

る。その結果、下記二項目の身体性機能が発現したことが確かめられた。

- 非駆動関節である粘弾性関節が、身体構造を通じて、他の駆動関節から生じる駆動力を有効利用し、周期的動作を実現したこと。
- 粘弾性関節が衝撃を吸収する性質を有することで、地面衝突などの外乱に強くなり、脚移動体の動的安定性を向上したこと。

第六章においては、前章で確かめた粘弾性関節構造に関する身体性機能を詳しく調べるために、駆動関節数を制限(制約条件の導入)し、二脚移動体の進化的設計を行った結果について述べている。獲得された脚移動体の物理的特性の解析により、粘弾性を有する二脚移動体の関節構造がエネルギー消費量との関係性(脚の運動に重力を有効利用できるようになるため、エネルギーの省力化が図れることと運動が滑らかとなる)が示されている。さらにその物理的表現形を基に、前頭面上の腰1自由度の制御による高いエネルギー効率を有する脚移動メカニズムを明らかにし、準受動歩行ロボット(二脚・四脚移動体)を構築するにいった。

第7章では、論文全体に亘る結論として、

- ◆ 身体性機能の評価指標を調査した結果、従来の脚移動体の代表例(ZMP制御型、CPG制御型、準受動型)に対して、重量・サイズ・環境条件を統一し挙動の比較解析を行い、エネルギー消費量と情報処理の負荷が身体性機能発現の指標となることを確認したこと。
- ◆ 進化的設計法のシステム構成として、形態と制御の同時進化アーキテクチャとインタラクティブな設計アーキテクチャを用い、その解探索特性について大域的探索能力と局所的最適化能力を併せ持つことと、設計者の創作能力を付与することが可能となったこと。
- ◆ 提案した進化的設計システムが身体性機能を発現することを実証し、次の二種類の機能を解析し、それらの特性を明らかにしている。
  - 粘弾性関節が、身体構造を通じて、他の駆動関節から生じる駆動力を有効利用し、周期的動作を生成する機能。
  - 粘弾性関節が、衝撃を吸収する性質を有することで、地面との衝突などの外乱に強くなり、脚移動体の動的安定性を向上させる機能。
- ◆ インタラクティブアーキテクチャを用いて、駆動関節数を制限することにより、粘弾性を有する二脚移動体の身体構造とエネルギー消費量との関係性を明らかにしていること。また、その物理的表現形として、前頭面上の腰1自由度の制御による高いエネルギー効率を有する脚移動メカニズムの解を発見したこと。
- ◆ 上記の成果を実機に適用し、従来の脚移動体と比べ、高いエネルギー効率を有する新しい準受動歩行ロボットを実現したこと。

本論文は、脚移動体を作り出す進化的設計システムを提案し、その有効性を示した。これはロボット工学において、また進化計算論の研究において価値ある成果を得たと評価でき、工学全般の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)学位請求論文として合格と認められる。