

## 論文の内容の要旨

論文題目 Evolutionary Design for Emergence of Embodiment on Legged Locomotion

(和訳 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)

氏名 松下 光次郎

本論文は、脚移動体に内在する身体性機能の物理的表現形を明らかにするために、進化的計算法を用いて試行錯誤的に適応度の高い構造を有する解を発見させ、それらの解の物理的特性を解析し、関節構造、材料特性、エネルギー消費量の三者の関係を明らかにしている。

本論文の主題となる身体性機能は、認知心理学の認識に基づいて定義されており、特殊な身体的特徴から生じる環境適応度の高い運動を発生する機能とし、特に脚移動体においては「エネルギー効率」「情報処理の負荷」に関する重要な要素として位置づけられている。

身体性機能を有する脚移動体を作り出すためには、身体と環境との相互作用の中で、安定した脚移動に適合するセンサ情報や運動情報を獲得し、後天的に身体構造と制御系の設計に反映させる必要がある。しかしながら、一般的な設計法でその解を得ることは困難であり、新しい設計原理が必要となる。本論文の独創的な点は、この問題へのアプローチの方法として、進化的計算法を用いて設計を行う方法を提案し、これを実行するための進化的設計システムの構築を行ったことに集約され、その解探索の詳しいメカニズムが論文内で述べられている。また二脚移動体の進化的設計の結果、粘弾性関節の二種類の身体性機能を発見するに至り、それら粘弾性関節を含む身体構造と移動におけるエネルギー消費量の関係を明らかにすることで、身体性機能の物理的表現形を実現した。さらに、その物理的表現形を利用することで準受動歩行を実現することが確かめられている。

本論文は、序章と結論のほか五つの章から構成される。以下に各章における要約を記述する。

序章においては、本論文の意義と目的、および、研究背景を詳述している。特に研究背景では、認知科学分野およびロボット工学分野における「身体性の概念」の研究動向や、脚移動体の研究動向を詳しく述べている。

第二章においては、ロボット研究における代表的な脚移動体に注目し、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、剛体動力学シミュレータを用いて構築した仮想空間内に共通身体条件（サイズ・重量）を有する3種類の脚移動体モデル（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」に関して、脚移動体の身体性機能と評価指標を明らかにしている。

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」の構成を述べている。

第四章においては、脚移動体の身体性機能を発現させるために、第二章において示された評価指標を用いて、新しく進化的設計システムを提案している。提案システムは「同時進化アーキテクチャ」と「インタラクティブアーキテクチャ」により構成され、これら二つのアーキテクチャを繰り返し適用するシステムとして構築されている。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解の探索手法として、遺伝的アルゴリズムを用いた意義を明らかにし、大規模探索を要する設計問題の解決可能性について示している。さらに、インタラクティブアーキテクチャにより、設計者の創作能力を解空間の制約条件として、導入する手法について述べられている。

第五章においては、二脚移動体の進化的設計の身体性機能発現に関する検証結果について述べられている。獲得された二脚移動体の挙動解析の結果、以下に示されるような脚移動メカニズムに関する粘弾性関節の二種類の効果を明らかにし、提案する進化的設計が身体性機能を発現することを実証した。

- 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。
- 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。

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）を有することを明示した。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。

結論においては、各章の要約および本論文の成果を述べるものである。本論文における重要な成果を以下に示す。

1. 脚移動研究において代表的な脚移動体を同一条件の仮想空間内に構築し、挙動解析から、それらの脚移動体に内在する身体性機能を物理量で明示した。
2. 身体性機能を発現する進化的設計システムを提案し、その設計法により発現した脚移動体の身体性機能を実証した。
3. 二脚移動体における身体性機能を「関節構造と材料特性の組み合わせ（身体性）」と「移動のエネルギー消費量（機能）」の物理的表現形で示した。
4. 身体性機能の物理的表現形を利用することで、1制御自由度で動作する二脚・四脚の新しいタイプの準受動歩行ロボットを構築した。