

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中西 雄飛

本論文は、「超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイドの全身協調運動実現システムの構成法」と題し、脊椎や肩甲骨など自由度の多い身体構造に対して多数の冗長な筋駆動系を有する筋骨格ヒューマノイドにおいて、継続的な行動実現を可能とするための身体構造の設計、身体状態の情報獲得と診断、全身の安定な運動実現法の提案を行い、実システムを構築し行動実現を通してシステムを評価することでその構成法を明らかにしようとする研究をまとめたものであり、8章からなる。

第1章「序論」では、超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイドは、発展性の高い身体構造で柔軟な運動実現が可能な一方で、その身体の複雑性ゆえに動作時の故障や修理の容易性を考慮した持続可能なシステム構成法が重要であることを指摘し、研究の背景と目的、論文の全体構成について述べている。

第2章「全身協調運動を実現する超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイドのシステム構成」では、ロボットの身体の複雑性によってセンサ特性やアクチュエータ特性が逐次変化するため、変動する自己身体に柔軟に対応可能なシステムと持続的学習行動を安定維持する環境の構築が重要であることを指摘し、人間における生理学、神経解剖学、脳計算論的な観点から俯瞰し問題点を照らし合わせつつ論じている。そして、本件研究でのシステム構成法においては、1) 全身運動可能な超多自由度冗長筋骨格身体設計、2) 自己疲労診断機能に基づく複雑身体の恒常性維持システムの構築、3) 身体運動情報に基づく自己受容身体感覚の修正獲得システムの構築、4) 持続的学習による実世界身体動作パラメタ決定に基づく全身協調運動の実現、の4つに焦点をあてることを導き、以降の各章において、この4つを具体的に論じることを述べている。

第3章「全身運動可能な超多自由度冗長筋骨格身体設計論」では、超多自由度かつ冗長筋駆動骨格構造を有する筋骨格ヒューマノイドの基本的設計方針、設計手法について論じている。複雑で壊れやすい身体構造であっても、1) 大出力の駆動系搭載、2) 強固な骨格構造実現、3) メンテナンス性向上、の設計要件を満たしつつ安定した身体運動を実現するために、温度制御に基づく小型高出力な駆動系の実現、及び、新たに体内構成要素摘出パスを考慮した充填型骨格設計法を提案することで問題を解決する方法を示している。これは更なる自由度関節、筋数を増加した場合にも有効な発展性の高い設計手法であることを述べている。

第4章「高出力駆動を備えた超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイド小次郎の身体実装」では、開発したヒューマノイド小次郎の全身各部での設計コンセプトと設計デザインの詳細を示し、提案した設計論に基づく実際の設計開発具体例を挙げることで、前章の設計論の具体的な展開を示している。

第5章「自己疲労診断機能に基づく複雑身体の恒常性維持システムの構築」では、複雑な身体構造を持つロボットシステムであっても疲労状態を自己診断することで故障を未然に防ぎ、安定した恒常的身体状態を維持することが可能なシステム構築について述べている。実時間筋疲労診断に基づくモータ焼損防止機構により各筋損傷を防ぎ、ロボット全身体情報提示機構により膨大な全センサ情報の統合的な判断を人間に委任することで、よりロバストな運動実現環境が実現可能であり、多入力多出力からなる複雑なシステム全般に適用が利くシステム構成であることを示している。

第6章「身体運動情報に基づく自己受容身体感覚の修正獲得システムの構築」では、超多自由度冗長筋骨格

ヒューマノイドの膨大な駆動筋に付随する自己受容感覚センサから得られる運動時のセンサ相対量を、関連する不変な身体情報(筋配置, 骨格質量等)に基づき真値を状態推定することで, 身体状態変化(筋の伸び等)にロバストな感覚系を実現できるシステムを提案し, 実際に小次郎上で実装したシステムが機能することを検証している. これにより膨大な数のセンサキャリブレーションが不要となり持続的な運動継続が可能となる. また, 状態推定を行う上では全身分布した駆動筋の冗長性や関節筋間の非線形性といった筋配置の複雑さが逆に有効に働くため, 筋骨格系においては筋配置の複雑性を意識した設計が重要であることを指摘している.

第7章「持続的学習による実世界身体動作パラメタ決定に基づく全身協調運動の実現」では, 前章までに述べた方法論をもとに構成したロボットの運動システムの構成法と実験について述べている. 運動システムは, 運動生成, 運動制御, 適応学習の3つの機能を中核とし, 自己身体モデルとその動作パラメタの修正を持続的学習に基づいて行い, 関節運動による全身運動, 筋群運動による関節運動, 筋内駆動調節系による筋運動といった階層性を備えた構成として提案している. 階層性を利用することで運動の制御空間と適応の学習空間の縮小が可能となり, 実身体に基づいた動作パラメタの持続的学習が可能となり, その学習されたパラメタに基づいた全身協調運動の実現が可能となることを小次郎での実験により検証している.

第8章「結論」において, 各章で述べた内容をまとめることで本研究を総括し, 今後の超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイド研究の発展の方向性について述べている.

以上, これを要するに本論文は, 人のようにしなやかさと力強さを兼ね備えた筋骨格型のヒューマノイドのシステム構成法の研究において, 複雑さと運動性能を高めた身体においても故障を避けて持続的な運動実現を可能とするための課題を整理し, その身体設計法, 診断システム, 感覚運動対応情報獲得法, 運動実現方式を提案し, 試作した等身大の筋骨格ヒューマノイドにおいてその有効性を検証したものであり, 知能機械情報学上貢献するところ少なくない. よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる.