

論文の内容の要旨

論文題目 人体模倣筋骨格ヒューマノイドにおける脚構造の構成法と動作実現

氏名 浅野 悠紀

本論文は、ヒューマノイドに求められる柔軟な身体構造及び、環境適応能力を有する人間に学び、人体の冗長筋骨格構造を詳細に模擬した人体模倣筋骨格ヒューマノイドとその動作実現システムの構築を行うことで、これまでに無い身体構造であり、それを活かした動作実現可能なヒューマノイドの構成論を示すことを目的とする。特に、ヒューマノイドにおける「脚」に着目し、人体の脚構造における関節構造や、筋配置、自由度構成に基づく人体模倣設計実装を行っていく。このような人体模倣筋骨格ヒューマノイドの脚構造設計と動作実現システムの開発を通して、人体理解に基づくヒューマノイド構成アプローチの有効性と筋骨格ヒューマノイドにおける新たな可能性を示していくものである。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的について述べ、人体模倣筋骨格ヒューマノイドの脚構造を構成し動作実現を行っていく本論文の方針を述べた。

第2章「人体模倣筋骨格ヒューマノイドの構成論と動作実現」では、本論文で扱う人体模倣によるヒューマノイド構成アプローチとして、「身体設計における人体模倣」と「動作実現における人体模倣」を設定し、本論文の目標であるヒューマノイドの実世界環境での動作実現について言及した。身体設計の指針として、人体模倣身体プロポーシ

ョン, 人体模倣骨格関節構造, 人体模倣筋配置, 人体模倣関節特性の四項目を設定し, これらについて人間との比較を交えつつ, 議論を行った. また, 人体模倣筋骨格ヒューマノイドで行っていく実世界環境での動作実現として, 環境接触動作, 屋外環境での動作, 踏み出し動作の三つを設定し, 必要な全身動作システム構成として, 人間のバランス戦略に則り全身分布型のカセンサを活用したバランス戦略と, 冗長な筋骨格身体構造と実機モデル誤差によって生じる筋負荷の緩和のための身体筋負荷分散を行う筋制御の必要性について触れ, 構築する動作実現システムの全体像を述べた.

第3章「脚構造における人体機能抽出に基づく骨格構造設計」では, 人体模倣筋骨格ヒューマノイドの脚構造の設計について述べた. ヒューマノイドにおける脚は全身の負荷を支える必要があるため, 負荷を支え動作を行うためのシンプルな構造と, 人体模倣による複雑な構造のトレードオフであり, 全ての人体機能を再現することは困難である. したがって, 人体の機能で重要な部分を抽出しヒューマノイド構造として落とし込むことによる, 機能抽出に基づく骨格構造設計によって人体模倣筋骨格ヒューマノイドの脚構造設計を進める方針を示した. 具体的な構造として, 骨格構造設計では, 骨の二層構造を模しバッテリーを骨格内に収納する電源一体内蔵型骨格や, 構成要素を高密度に配置し構成要素間で熱負荷を分散する熱源密着型放熱構造を実現し, 骨格の多機能化を進めた. 膝関節においては, 人体機能の終末強制回旋機構による回旋自由度とそのロック機構を備えた膝関節の設計と実装を行い, 膝の回旋自由度を利用した動作として, 着座時の環境接触状態における膝回旋自由度を利用した足先ペダル操作を実現した. また, 転がり滑りと十字靭帯構造による大可動域性能を抽出し, クロスリンク構造による大可動範囲を備えた関節構造を実現した. 足部においては, 環境に適合する柔軟性を与えるために, 人間の足部が多くの骨から構成される多骨連結構造に着目し, 単純な平板ではなく, 多自由度をもち柔軟な足部構成の一例を示した.

第4章「人体模倣筋構造の構成と制御」では, 人体模倣筋骨格ヒューマノイドの人体模倣筋配置を構成するための筋構造や筋制御のあり方について述べた. 人体模倣筋配置では, 非常に多くの構成要素を高密度に配置する必要があり, ケーブルパスが複雑化しやすいため, 筋アクチュエータに必要なモータ, モータドライバ基板, センサ, カバーをパッケージ化し一体としケーブル保護などによるメンテナンス性を重視した構成として, センサドライバ統合型筋モジュールを提案, 実現し, その有効性を述べた. 筋モジュールの配置汎用性を活かし, 筋骨格ヒューマノイドの全体に渡るアクチュエータ部を提案した筋モジュールによって共通化していくことで, 複雑な身体でありながらも高いメンテナンス性, 張力制御に基づく高い運動性能を備えた人体模倣筋骨格ヒューマノイドを構成することが可能となった.

人体模倣筋配置とすることによって, 筋経路と身体の複雑度が増し, 実機モデル誤

差の影響が大きくなることと、筋冗長度が増すことによって、筋負荷の偏りが生じやすくなる。この負荷を緩和し、身体を破壊しない柔軟な筋制御の必要性を受け、筋負荷分散の実装を行った。筋間協調に基づく負荷分散は、筋間の張力値に基づいて筋制御可能な点がメリットであり、膝や肩関節における張力分散を実現した。一方で、新モータドライバによって可能となった電流フィードバックによる張力制御に基づく負荷分散は、全筋での安定的な張力制御が可能であり、外力に対する柔軟な馴染み動作を実現した。

第5章「全身分布型センサの活用に基づく姿勢安定化戦略」では、従来のヒューマノイドのように、運動学解析、正確なZMP計測と位置制御に基づくバランス制御ではなく、人間の方法に学んだバランス制御の枠組みを構築していくために、人体模倣筋骨格ヒューマノイドにおける冗長な全身分布力センサ系を利用した安定化指標とバランス戦略を提案し、その評価検証について述べた。人間のように全身分布型センサ構成を活用するバランスの方法として、従来の6軸力センサに依存するものではなく、筋骨格ヒューマノイドの筋アクチュエータから得られる筋張力を利用した安定化指標として筋張力ZMPを提案し、その妥当性を確認した。また、多骨連結構造を模した柔軟足部において、多軸の一軸力センサに基づくZMPを算出し、従来のZMPと同様の傾向が得られていることを確認した。バランス戦略の実装に関しては、人間のバランス戦略を参考とし、1) 背骨を活用したSpine stabilizer, 2) 股関節足首を活用したAnkle-hip stabilizer, 3) 足趾を活用したFinger stabilizerの三つについて、目標ZMPと現在のZMPの誤差に基づいて重心変位補償を行うバランス系の実装を行った。さらに、これらの人体模倣型の姿勢安定化指標とバランス戦略を組み合わせ、前後バランスや重り付加、外乱応答実験を通して、提案手法の有効性を示した。

第6章「人体模倣筋骨格ヒューマノイドの身体設計と人体模倣度評価」では、人体模倣筋骨格ヒューマノイド 隼志郎及び隼悟郎の身体構成の詳細の説明を行い、身体設計における人体模倣について評価を行った。身体設計における人体模倣に基づく隼志郎、隼悟郎の身体構成について、身体構成、骨格構造、筋構造、関節特性の観点から説明を述べた。人体模倣度の評価では、身体設計における人体模倣の4項目について隼志郎、隼悟郎の全身構成を人間と比較し、達成度と今後の課題を考察した。

第7章「人体模倣筋骨格ヒューマノイドによる動作実現」では、前章まで述べてきた人体模倣筋骨格ヒューマノイドの身体構成と、動作実現システムの実装によって可能となった動作実現について述べた。屋外環境動作、立位時のマニピュレーション動作の実現を通して、上半身動作中であっても安定性を確保するバランス戦略の有効性と、身体設計スペースが制約となる筋骨格ヒューマノイドにおいても体内自律駆動系を確

保する電源一体型骨格の有効性を示した。環境接触動作として、壁利用踏み出し動作、自動車運転動作、寝返り動作を実現し、環境より受ける反力を柔軟に吸収する筋制御と脚において十分な筋出力が発揮できることを確認した。自動車運転動作においては、着座時のようなリンクが環境に接触し拘束されているときに、脚部の冗長自由度が有効であることを指摘し、動作実現を通して、冗長自由度の有用性を実証した。踏み出し動作においては、踏み出し後の身体加速度を緩和し転倒を防止しやすいような軌道生成を行い、動作実現を通して、人体模倣筋出力設計と軌道生成の有効性を確かめた。これらの実現によって、本研究で取り組んできた人体にハードウェア及びソフトウェア的に学ぶことで構成された人体模倣筋骨格ヒューマノイド身体構成法と、バランス戦略、筋制御からなる全身動作実現システムの有効性を示した。

第8章「結論」では、本研究を総括し、結論と今後の展望について述べた。

以上、本論文は、「身体設計における人体模倣」に基づき、従来の筋骨格ヒューマノイド身体をベースに人体解剖学に基づく人体模倣身体設計の要素を取り入れ、「動作実現における人体模倣」を目指し、人体模倣型のバランス戦略や筋制御法の構築を進めることで、人間のように実世界環境での動作実現が可能な人体模倣筋骨格ヒューマノイドとその動作実現システムの構築を行ったものであり、環境接触動作、屋外環境動作、踏み出し動作などの動作実現を通して、有用性を示したものである。