

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

筋骨格ヒューマノイドの関節駆動構造における機能統合構成法に関する研究

氏 名 上月 豊隆

本論文は、ロボット身体を構成する各要素の素材、形状、特性等を多面的に捉え同時に複数の機能を満足するように要素を設計しそれぞれの構成要素の多機能化を実現する「機能統合構成法」の考え方を提案し、これに従い筋骨格ヒューマノイドによる柔軟な動作生成に必要な要素技術、全身におけるその統合、動作検証実験に取り組みその有効性を論ずるものである。

従来のヒューマノイドの設計アプローチは、既存の個別最適化された要素部品を組み合わせるに留まっており、求められる機能数に比例し必要な構成要素数が増加し、ハードウェア構成の大型化・煩雑化につながっていた。ここに幅広く多様な動作生成ができないヒューマノイドの原因があると考え、ハードウェアシステム構成法の課題を指摘することが出来る。ヒューマノイドが多様な動作生成を実現するには、人としての形状を保ち限られた空間制約下に収まっていることが必要であり、現構成法ではこのトレードオフを解決することができない。そこで「機能統合構成法」を筋骨格ヒューマノイドの関節駆動構造に展開し、以下の設計提案・実装・検証を進めた。

- 筋と骨に着目した多自由度・広可動域構造の駆動  
人間は身体を骨から形成される多自由度構造を筋肉の収縮によって駆動するが、

従来この仕組みを取り入れたヒューマノイドでは筋と骨の密接した関係を十分に再現できておらず、骨が構造として力を支えるだけにとどまっていた。人体構造では骨は構造として力を支えることに加え、筋の付着点としての機能、筋が巻き付く表面の機能、関節としての機能、と様々な機能を同時に実現しており、これを工学的に表現する場合に機能単位での切り分けをするだけでは機能の数だけ要素数が必要となってしまうためそれぞれの要素を統合することが必要であった。筋骨密着構造を取り入れ、骨格に構造体・関節・筋付着点の機能を統合する設計を提案しこれにより多自由度・広可動域構造の駆動を可能としている。

- 筋と腱の仕組みを模擬した分散制御構成の駆動系構築

筋骨格構造の駆動系に柔軟性を取り入れるにあたり、人体の筋腱複合体の仕組みを筋肉の挙動を張力制御駆動のモータと、腱の挙動を非線形バネ要素による組み合わせで表現することを提案している。張力制御時のワイヤのたるみが柔軟な駆動を行う上での支障となるためこれを抑制する制御構成に取り組みとともに、全身でモータが100にも及ぶ分散制御構成を考慮し駆動に要する諸要素を統合することにより小型で高信頼性を有する駆動モジュールを構築している。

- 伝熱・排熱機能を統合した気化排熱骨構造

柔軟な筋骨格ヒューマノイドの駆動を進める上でモータの低ギア比化の必要があるが、熱対策のための要素を追加することは空間制約上厳しいといえる。既存のヒューマノイドでは骨格は構造体として力を伝える役割しかなく、内部の体積や表面積は十分に利用されていないことに注目し、骨格の内部を水路として利用し、表面は気化熱による冷却が可能な、金属粉末焼結によるポーラス構造の2層構造を取り入れた骨格設計法を提案している。この骨格の強度や冷却性能の検証を行うことで、骨格への構造体・伝熱・排熱機能の統合検証を実現している。

これらの要素技術を踏まえ、等身大としての全身構成を考慮しこれらを統合することで、柔軟環境接触筋骨格ヒューマノイド「腱悟郎」を構築し実験にて、外力に対する柔軟動作が可能であること、連続的な力強い動作が可能であることを検証し、限られた空間制約の中で十分に柔軟な動作生成が可能な筋骨格ヒューマノイドの構築が実現したことを示した。

本研究は、幅広い動作実現といった、様々な要件を満たすことが求められるヒューマノイドの身体を実現するにあたり、身体を構成する要素に複数の機能を担わせることでシステムの複雑化・大型化を回避する機能統合構成法を提案し、これを筋骨格ヒューマノイドの関節駆動構造に適応することで、その有効性を示すものである。