

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 神永 拓

本論文は、力感受性を有するロボットの関節駆動機構の設計論について論じたものである。多くのロボットシステムにおいては優れた出力質量比を有する直流モータあるいは同期型交流モータを用い、その動力を歯車伝達機構で減速、伝達して用いている。ロボットシステム、とくに人間とのインタラクションが求められるヒューマノイドロボットなどでは、力が正確に制御できて外力に対して敏感に反応するバックドライバビリティと呼ばれる性質が必要とされる。これまでこの問題に対して多くの研究がなされてきた。出力端での力を計測し、それをフィードバック信号として閉ループ制御系を構成するものが多いが、接触問題等の高周波帯域にわたる性能が要求される場合において、十分満足できる性能を達成するには至っていない。この原因の一つは、減速器を含む動力伝達系に非線形なクーロン摩擦が存在し、これが力の伝達を阻害していることによる。本研究は、歯車伝達系とは異なる機械接触の性質をもつ油圧伝達系に着目し、クーロン摩擦の影響をできる限り抑えることで伝達系の特性を高性能にするロボット関節駆動機構の設計法に取り組んだものである。

油圧駆動機構は一般に大型で重いと考えられている。また、サーボ弁を用いる電気油圧サーボ系は高い位置決め精度をもち高負荷ロボットの駆動系として使われているが、油漏れを防ぐためのシール材料の摩擦が大きく、これを大きな油圧力で補ってきた。このためバックドライバビリティの観点からは満足できる駆動系とはなっていない。これに対して航空機分野で用いられている電気静油圧アクチュエータ (Electro-Hydrostatic Actuator、以降 EHA) はポンプの回転制御で油圧モータの回転を制御する容積型のアクチュエータであり、受圧面積比によって減速効果を得るものである。多自由度系において、電気油圧サーボ系が 1 個の大きなポンプが作る圧油を自由度の数だけの重いサーボ弁で分配するのに対して、EHA では自由度の数だけの小さなポンプを用いてサーボ弁を用いないという違いがある。EHA は比較的構造が単純であることから、クーロン摩擦を低く抑えるような工夫の余地の残された機構でもある。本論文では、EHA の対称性を生かすことで、クーロン摩擦のような非線形摩擦を極力排し、高い力の双方向伝達性能を示す駆動機構の設計法を開発した。バックドライバビリティが非線形摩擦項により損なわれることを示し、その条件を導出した。また、ヒューマノイドロボットの駆動関節の中でも特に小さい関節である指の関節、および特に大きな関節である膝関節に、バックドライバビリティの条件を考慮した設計、試作、性能評価を行った。さらに、設計法を拡張することにより装着型のロボットの関節機構の設計を提案した。

第 1 章、「Introduction」では、ロボットシステムと駆動機構の先行研究とその課題について文献とともに概観している。駆動系の進化とロボットの進化を通じて、どのような要求に応じてどのような駆動機構が用いられてきたかをたどっている。近年では人間とのインタラクションなど力を制御する要求が増え、力感受性の必要性が高まっていることを述べている。また、バックドライバビリティの概念を説明し、その重要性を指摘している。

第 2 章は「Electro-Hydrostatic Actuator」と題して、EHA のモデル化とそれ用いた特性の解析を行っている。この章は以降の章の設計法を与える理論的背景となっている。提案したモデルでは EHA のポンプと油圧モータが本質的には対称であることを利用して、関係式が速度項で結合された対称な一対の運動方程式で記述されることを示した。EHA においてバックドライバビリティが全バックドライバビリティと出力バックドライバビリティの 2 種類に分類できることを示し、それぞれの条件を導出した。これを用いて、バックドライバビリティが損なわれる原因が非線形摩擦にあることを示した。

第 3 章では「Miniature Electro-Hydrostatic Actuator and Anthropomorphic Robot Hand」としてヒ

ユーマノイドハンドの指関節に用いることができる小型 EHA への設計論を展開している。非線形摩擦を低減しつつ部品の保持精度を確保する予圧ベアリング方式を提案した。指駆動用の 4 種類のベーンモータを開発し、そのうち最も大きなタイプについて詳細な解析を行った。また、他の駆動方式との比較から当該容積のアクチュエータにおいて強度、バックドライバビリティともに EHA が優れた性能を有することを示した。さらに、試作した EHA を用いたロボットハンドを用いて把持実験を行い、力感受性の評価を行った。

第 4 章では「Structural Approach to Performance Enhancement in Miniature Actuators」と題して機械加工精度を高めることで機械摩擦を低減することの効果を検討したベーンモータの開発を行った。加工精度の向上が全バックドライバビリティに大きく寄与することを実験的に示した。同様のベーンモータをポンプとともにクラスタ化することにより動力ユニットを構成し、その動力を指関節に摩擦が少ないワイヤ機構で伝達するロボットハンドに適用した。

第 5 章は「Large Capacity Electro-Hydrostatic Actuators and Humanoid Robot Knee Joint」とし、第 2 章の手法をより大型の関節駆動機構に適用する方法を示した。この章では、実在するロボットの質量パラメータを用いて求める動作仕様とし必要な性能を求めている。同時に、アクチュエータが発揮可能な性能をより正確に求める手法を提案している。実機での評価からバックドライバビリティを確認し、バックドライバビリティの推測方法の妥当性も示した。また、他の動力伝達方法との比較から、特に強度を要する用途において EHA が有効であるだけでなく、バックドライバビリティにも優れることを示した。

第 6 章は「Design of Electro-Hydrostatic Actuator for Human Assistive Robot Based on Human Motion Analysis」と題し、第 5 章までに用いてきた手法を拡張し、人の運動解析と組み合わせることで EHA を用いた装着型ロボットの関節機構を設計している。CS-30 テストと呼ばれる高齢者の運動能力テストの結果を定量的指標とし脚力との相関からアクチュエータの要求運動能力を求めている。また、第 5 章の課題であったオイルシールの摩擦を低減する設計を行い、推定で摩擦トルクを 1/100 にできる設計法を示した。

第 7 章は[Conclusion]であり、本研究の結論を述べている。

以上を要するに、本論文は EHA の構造の対称性を生かしたモデル化を通じて設計論の構築を行い、それに基づいて小型のアクチュエータから大型のアクチュエータまでの具体的な設計とその試作を通じて検証を行い、バックドライバビリティをもつ関節駆動機構の設計による力感受性を有するロボットの実現可能性を示したものであり、知能機械情報学に貢献するところが大きい。

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。