

## 論文の内容の要旨

本論文は空気圧ゴム人工筋肉アクチュエータと磁気粘性流体 (MR 流体) ブレーキで構成された関節駆動機構の制御手法の確立を目的としている。本機構は空気圧ゴム人工筋肉の可変弾性特性と MR ブレーキのエネルギー消散機能を有し、この空気圧ゴム人工筋肉特性の利点を活かし、欠点を補償するための MR ブレーキの利用法の検討とそれを組み込んだ制御系を開発することで、生体筋のような可変粘弾性特性が発現でき、更には生物のようなダイナミックな動きも実現できる関節駆動系が実現できる。

はじめに、本関節の構成要素である空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキの特性を基に、人工筋肉の収縮力、収縮量、印加圧力間の非線形特性を数式モデルで表すと共に、MR ブレーキがクーロン摩擦に近い出力特性を有することを明らかにした。次に、空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキを利用したマニピュレータ関節の制御系の動特性を、比例電磁弁への指令値から人工筋肉の変位までを要素毎にモデル化した。

このモデルを基に、上記関節駆動機構を組み込んだ1自由度マニピュレータの角度、剛性制御系の設計を行った。本関節機構の空気圧人工筋肉アクチュエータは弾性を有するため振動を生じやすく、これを空気圧制御で抑制するには限界がある。そこで、空気圧応答より高速な MR ブレーキを制御系に組み込み、振動抑制を行った。その際、MR ブレーキには人工筋肉の目標値追従を阻害しないことが求められるため、規範となる内部モデルを利用し、その出力と実際の出力の差を MR ブレーキにフィードバックする内部モデル制御手法を開発した。これにより、人工筋肉と MR ブレーキが競合することなく振動を抑えながら目標角度を達成することができた。

また、次の段階として、人工筋肉にエネルギーを蓄積し、瞬時に解放することで、高速にアームを動作させることのできる制御手法を確立した。そのために、MR ブレーキの指令をフィードで生成することにより、MR ブレーキを可変粘性ダンパとして用いると共に、関節駆動に用いる拮抗筋肉側のアクチュエータを適切なタイミングで駆動する手法を開発した。

最後に、本マニピュレータを2自由度化し、投擲運動の制御をおこなった。まず、人工筋肉アクチュエータをバネモデルで表現し、投擲運動の設計を行った。その際、投擲動作をいくつかのフェーズに分割し、投擲距離、関節のオーバーシュート、エネルギー効率などからなる評価関数を最適とするフェーズの切り替えタイミングを決定した。シミュレーション結果からは、マニピュレータが腕を畳んで回転し、投擲直前に腕を伸ばすことで手先を加速させる動作が生成された。また、各関節の剛性と粘性は、この挙動と矛盾しない応答となった。次に、実機による再現を行い、シミュレーション結果と同様の傾向を得ることができた。

以上のように、本論文では空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキを組み合わせることで、人工筋肉の弾性特性に起因した振動成分を MR ブレーキで補償し、その弾性特性の利点である関節のハードウェア特性としての剛性、角度制御を実現すると共に、エネルギーの蓄積と瞬時の解放による高速動作の実現手法を確立した。更に、多リンクへの拡張手法を提案し、その有効性を検証した。上記結果は人間支援に向けたソフトロボティクスの実現に大いに資するものと期待される。

## 論文審査の結果の要旨

提出論文は、近年介護、福祉ロボット等への利用が期待されているスマートアクチュエータのロボット制御への応用手法に関するもので、空気圧ゴム人工筋肉アクチュエータを利用した関節の制御手法の開発が行われている。その際、ゴムの弾性特性に起因した振動を抑制し、更にはゴムをエネルギー蓄積に利用した瞬発力発生装置として利用するため、MRブレーキを併用した駆動系が開発されている。論文内容は、その駆動系のモデル化、1自由度マニピュレータの制御手法の確立、多リンク機構への応用から成る。

まず、第1章では、研究背景としてマニピュレータが様々な環境で使用されるようになったことに触れ、従来の高剛性なマニピュレータだけでなく人間親和性の高い柔軟なマニピュレータが求められていることを説明している。そのために空気圧ゴム人工筋肉と磁気粘性流体(MR流体)ブレーキを組み合わせた関節機構を提案し、本関節による様々な運動の実現を目的とした。これには基本的な位置制御や剛性制御、振動制御を含み、さらに、人工筋肉の弾性特性を利用したエネルギーの蓄積と解放による高出力の発生も提案している。

第2章では空気圧ゴム人工筋肉の一種である軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉に注目し、他のアクチュエータに比べアドバンテージがあることを示している。そして、本人工筋肉の出力特性を実験的に求め設計パラメータを定めた。さらに、入出力間の非線形性を打ち消すために、入力圧力と外力を与えた状態の力学的な平衡関係から、本人工筋肉の力学的平衡モデルを求めている。最後に本モデルを利用した人工筋肉の制御系を提案し、実験での入出力の線形化に成功した。

第3章ではMRブレーキに使用しているMR流体の基本的な特性と、MRブレーキの構造について説明している。そして、特性試験装置によってMRブレーキの出力特性を実験的に求め、入出力の関係を求めた。この結果、本MRブレーキの出力は運動の速度に対する依存性が低く、クーロン摩擦に近いことを明らかにした。ここまでの第2章と第3章によって、可変粘弾性関節の制御に必要な各要素の特性を説明している。

第4章では、可変粘弾性関節マニピュレータの特性を把握し制御するために、マニピュレータの動特性モデルを導出している。本モデルでは人工筋肉を拮抗配置した1自由度関節のマニピュレータをモデル化の対象とし、人工筋肉については空気圧供給システムを含めた人工筋肉の応答を要素ごとにモデル化している。そして、MRブレーキからのブレーキトルクを含めたマニピュレータの負荷系モデルと組み合わせることで1自由度マニピュレータの動特性モデルとしている。さらに本マニピュレータの制御系を人工筋肉の力学的平衡モデルを基に設計し、目標関節角度と目標関節剛性値から各人工筋肉への圧力指令値を

算出することが可能となっている。

第 5 章では、1 自由度可変粘弾性関節マニピュレータによる基本的な制御として、位置制御、剛性制御、振動制御をおこなっている。はじめに PI 制御を関節の位置制御に採用し、MR ブレーキとは独立に制御した。次に、人工筋肉と MR ブレーキの特性を考慮し、両者を統合する制御手法として内部モデル制御 (IMC) を利用した。本制御系では関節の運動の規範モデルを作成し、これを基に人工筋肉と MR ブレーキを制御している。結果として、MR ブレーキは振動発生時に人工筋肉の出力を補うように働き、人工筋肉の位置制御と競合せずに振動を抑制した。これにより、人工筋肉の特性を考慮した MR ブレーキ制御の有効性を明らかにした。

第 6 章では、これまでに明らかにした可変粘弾性関節が本来有する物理特性を有効に活用するための関節の駆動と制御手法を提案した。そして、関節の可変弾性と可変トルクブレーキ特性によってポテンシャルエネルギーを蓄積し、これを瞬時に解放することで瞬発的なアーム駆動をおこなった。さらに、本手法を用いた際のアームの位置制御と剛性制御について提案し、実験とシミュレーションによって有効性を明らかにしている。最後に MR ブレーキを制御することで可変粘性ダンパとして用い、振動抑制を達成した。

第 7 章では、第 6 章で述べた瞬発力の応用例として投擲動作を取り扱っている。本章では関節の出力向上だけでなく、多リンク構造を利用することで技巧的な動作によって運動能力の向上を目標とした。そこで、マニピュレータを 2 自由度化し、投擲運動の設計をおこなった。そのために、シミュレーションと最適化アルゴリズムの利用を提案し、シミュレーション時間を短縮するために本マニピュレータの簡易なバネモデルを構築した。

第 8 章では、第 7 章で拡張した 2 自由度可変粘弾性関節マニピュレータによる投擲運動の設計をおこなっている。これにともない、投擲運動を投擲距離、エネルギー効率、アームのオーバーシュートや関節の粘弾性変化率から評価する評価関数を作成し、最適な投擲運動を探索した。探索にはバネモデルによるシミュレーションと PSO アルゴリズムを利用した。最後に実機による検証を行い、シミュレーション結果と同様の傾向を得ることができた。

ソフトアクチュエータを制御に利用するための手法として、フィードバックといった制御系の設計だけでなく、その欠点を補うためのハードウェアとして MR ブレーキを併用した関節駆動機構の開発、及び、その機構特性の利点のみを發揮させることのできる制御系の開発は、人間支援のための様々なロボットを実用化するための重要なアプローチであると共に、ロボットの開発研究としての独創性、有用性も大いに認められる。よって、本論文は、博士 (工学) の学位請求論文として十分な水準を有するものと判断できる。