

論文の内容の要旨

“巻フィルムチューブ式形状記憶合金人工筋肉アクチュエータの開発”

石川 敏也

本論文は人間親和型ロボット専用の SMA 人工筋肉アクチュエータの開発を目的とする。近年、必要が高まりつつある人間と同じ生活空間で共存できる人間親和型ロボットには、人間に近い形態と柔軟性が要求される。そのようなロボットに使用する人工筋肉アクチュエータとして SMA が注目されている。

現在, SMA で大きな発生力と応答速度を獲得するために, 短時間で加熱・冷却できる細い SMA ワイヤを束ね合わせる方式が検討されている。しかし細い SMA ワイヤを束ね合わせると冷却媒体がワイヤ束中心まで届かず応答時間がさらに長く傾向があり, 実用上装置体積の割に大きな力が得られない問題があった。このような背景のもと, SMA アクチュエータはマイクロマシン等の小型システム向けの開発が中心となり, 人体サイズのシステムへの応用研究は十分には進められていない現状があった。

本研究では, 以上の問題点を解決する手段として, SMA 専用の機械要素として耐熱性と柔軟性に優れる「巻フィルムチューブ」を製作し, これに細い SMA コイルばねを挿入して「単セル」を組み立て, これを束ね合せて柔軟性とシーリング性に富む天然ゴムチューブに挿入し「モータユニット」を製作した。

これを生体筋の代わりとなる人工筋肉を目指す前提から, その基本特性を生体筋との比較を念頭に実験を行った。また人体と同様の拮抗配置による剛性制御手法の実験も行った。その結果, 生体筋に対し単セルは, 重量, 密度, 発生変位がほぼ同等で, 発生力・発生圧力が約 3.5 倍と大きいことが分かった。ただし, モータユニットは, 天然ゴムチューブを引伸ばすことに発生力の一部が取られるため発生変位が 26% になり生体筋や単セルの 40% と比べ小さくなった。

次に, 生体神経インパルスと同じ幅で同じ周波数帯域のパルス列による PFM 駆動実験によりパルス周波数にほぼ比例して発生力と発生変位が得られる事がわかり, 本 SMA アクチュエータに人体同様の制御が適用できる可能性が有る事がわかった。また, 拮抗配置による剛性制御実験により周波数の組合せで各剛性において角度が設定でき, ばね剛性を制御する機能をもった生体筋と同様の剛性制御が可能であることがわかった。

本研究のモータユニットには, 発生力の一部が天然ゴムチューブの伸長に取られるため, 発生変位が 26% に大きく低下する問題があった。この問題に対処するため, 天然ゴムチューブを引き伸ばしても十分有り余る発生力が出せるよう SMA コイルばねのばね定数高める検討を行った。その結果, 長方形断面素線コイルばねの採用により以下の成果が得られた。

1. 生体筋の 17 倍の発生力 5.2N (自重の 4,400 倍)。
2. 生体筋と同等の発生変位 44%。
3. 生体の遅筋並みの応答性である時定数 200ms。

以上より, 生体に近い柔軟性と拮抗剛性制御が可能な等身大の人間親和型ロボット実現の可能性を示した。今後 SMA のさらなる高性能化を目指し以下の課題に取り組む。

1. 応答性を実用的な速筋レベルまで高める。
2. パワー変換効率が低いため定位置保持に有効な保温効果で総合効率を高める。
3. モータユニットには量産化とその応用について検討する。

論文審査の結果の要旨

I. 論文の主題

巻フィルムチューブ式形状記憶合金人工筋肉アクチュエータの開発

II. 当該研究分野における位置づけ

近年、必要が高まりつつある人間と同じ生活空間で共存できる人間親和型ロボットには、人間に近い形態と柔軟性が要求される。そのようなロボットに使用する人工筋肉アクチュエータとして SMA が注目されている。

現在、SMA で大きな発生力と応答速度を獲得するために、短時間で加熱・冷却できる細い SMA ワイヤを束ね合わせる方式が検討されている。しかし細い SMA ワイヤを束ね合わせると冷却媒体がワイヤ束中心まで届かず応答時間がさらに長く傾向があり、実用上装置体積の割に大きな力が得られない問題があった。このような背景のもと、SMA アクチュエータはマイクロマシン等の小型システム向けの開発が中心となり、人体サイズのシステムへの応用研究は十分には進められていない現状があった。

本研究では、以上の問題点を解決する手段として、SMA 専用の機械要素として耐熱性と柔軟性に優れる「巻フィルムチューブ」を製作し、これに細い SMA コイルばねを挿入して「単セル」を組み立て、これを束ね合せて柔軟性とシーリング性に富む天然ゴムチューブに挿入し「モータユニット」を製作した。次に開発された SMA アクチュエータの PFM 制御手法を提案し、その位置と剛性の制御方法について提案した。さらにより高密度な SMA アクチュエータの開発を目指し長方形断面の全く新しい SMA アクチュエータの開発を行った。

III. 論文の構成（目次と各章の概要）

第一章：緒言 人工筋肉と SMA の開発について、現在までの人工筋肉と SMA の既存の開発状況とその応用事例について紹介した。さらに、これらの応用を鑑みた際の SMA の問題点について検討し、本論文の目的について記した。

第二章：形状記憶合金アクチュエータ SMA のアクチュエータとしての発現原理について 記述した。さらに現在提案されている様々な SMA アクチュエータのタイプを分類し、本論文の位置づけを明らかにした。

第三章：巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータ SMA 専用の機械要素として耐熱性と柔軟性に優れる「巻フィルムチューブ」を製作し、これに細い SMA コイルばねを挿入して「単セル」を組み立て、これを束ね合せて柔軟性とシーリング性に富む天然ゴムチューブに挿入し「モータユニット」を開発した。さらにその基礎特性について明らかにした。

第四章：剛性制御 生体神経インパルスと同じ幅で同じ周波数帯域のパルス列による PFM による制御法を提案し、駆動実験を行った。さらに、拮抗配置による剛性制御実験により周波数の組合せで各剛性において角度が設定できることを提案し、位置および剛性制御実験を行った。

第五章：SMA 長方形断面素線コイルばね

本研究のモータユニットばね定数高めるために、長方形断面素線コイルばねを用いた SMA

ユニットの開発を行い、その基礎特性について検討を行った。

第六章 結論： 本論文の要約を示し、今後の研究課題を記述した。

IV. 論文の独自性や成果

論文の独自性として以下の点があげられる。

- ・ SMA 専用の機械要素として耐熱性と柔軟性に優れる「巻フィルムチューブ」を開発し、これに細かい SMA コイルばねを挿入して「単セル」を組み立て、これを束ね合せて高出力・高応答な SMA ユニットを開発したこと。
- ・ 本ユニットの基礎特性を明らかにし、PFM 制御による位置・剛性制御を提案したこと。
- ・ SMA コイルばねのばね定数高めるために、長方形断面素線コイルばねによる SMA ユニットを開発したこと。

以上よりその成果を以下に示す。

- ・ 巻フィルムチューブによる SMA のユニット化および不活性流体の冷却媒体により、軽量で高出力・高応答なアクチュエータを開発した。
- ・ さらに生体筋肉への性能に迫るため、新たに開発された長方形断面素線コイルばねによる SMA ユニットは以下の成果が得られた。
 - ① 生体筋の 17 倍の発生力 5.2N (自重の 4,400 倍)。
 - ② 生体筋と同等の発生変位 44%。
 - ③ 生体の遅筋並みの応答性である時定数 200ms。

V. 論文の課題

以上より、生体に近い柔軟性と拮抗剛性制御が可能な等身大の人間親和型ロボット実現の可能性を示した。今後 SMA のさらなる高性能化を目指し以下の課題に取り組む。

4. 応答性を実用的な速筋レベルまで高める。
5. パワー変換効率が低いため定位置保持に有効な保温効果で総合効率を高める。
3. モータユニットには量産化と応用について検討する。

V. 論文の評価

本論文は生体筋により近い人工筋肉の開発として SMA アクチュエータを用いた全く新しい手法を提案した。論文の内容は、基本的なアクチュエータの提案・開発から制御系の提案および高剛性な SMA 素材等、幅広い検討も行っており、その成果も十分であると考えられる。

以上より本論文は博士(工学)の学位を授与する十分な水準に達しているものと評価する。