

## 「論文の内容の要旨」

“空気圧人工筋肉と磁気粘性流体を用いた可変粘弾性アシストシステムと  
そのモバイル化のための空気圧源の開発研究”

奥井 学

本論文では、軸方向繊維強化型人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキにより構成される可変粘弾性関節を有する装着型アシスト装置の開発と、その携帯化のための空気圧源の開発を行った。

第一章では、近年の労働人口の減少を背景とする装着型アシスト装置の必要性について述べ、可変粘弾性アクチュエーションのアシスト装置への適用が既存の装置の持つ課題の解決法となり得ることを述べた。次いで、提案する可変粘弾性アクチュエーション手法のアシスト装置への適用には携帯空気圧源が不可欠であることを述べた。

第2章では、可変粘弾性関節の制御手法について検討した。1自由度膝関節動作支援試作機を製作し、アシスト装置の関節粘弾性が装着者とその動作に対してどのような影響を与えるのかを調べ、その結果から人間の関節駆動原理を規範にした新たな粘弾性制御則を提案した。新たな粘弾性制御則は、アシスト動作を角速度と各加速度から運動の開始時、運動の停止時、保持アシスト、脱力の4フェーズに分け、粘弾性の大小を切り替える手法である。そして最後に提案した粘弾性制御則を用いて筋電位測定実験を行い、その有効性を確認した。

第3章では携帯可能な空気圧源の開発を目的とし、従来よりも軽量な構成を実現可能なハイブリッド空気圧源を提案した。始めに、既存の圧縮空気生成手法の携帯性比較を行った。比較対象はコンプレッサのバッテリー駆動、タンクへの充填、物質の相変化、クエン酸と炭酸水素ナトリウムの化学反応である。その結果から、それぞれの空気圧源の携帯性は一長一短であり、最適といえる手法が存在しないことを示した。次いで、複数の圧縮空気生成手法を組み合わせるハイブリッド空気圧源を提案した。ハイブリッド空気圧源は、高圧が発生可能であるが供給可能流量が少ない空気圧源と、発生圧力は小さいが供給流量が大きい手法を組み合わせ、空気圧源の総重量を削減する手法である。最後にジメチルエーテルの相変化による空気圧源と、液化二酸化炭素の相変化を用いた空気圧源を試作し、実験により提案手法の軽量化効果を示した。

第4章では、提案する可変粘弾性アシストシステムと携帯空気圧源を備えた下肢アシスト装置 **Airsist I** を提案した。はじめに **Airsist I** の構成について述べ、従来のアシスト装置よりも軽量で低慣性であることを示した。また試作した **Airsist I** 用ハイブリッド空気圧源は800NLの流量供給、0.7MPaの供給圧力を4kg程度の重量で実現できることを示した。

第5章では、**Airsist I** を用いた動作実験を行い、提案する可変粘弾性制御則と空気圧源の有効性について述べた。可変粘弾性アシスト実験では、2章で提案した制御則を用いてスクワット動作のアシストを行い、1自由度試作機の場合と同様に提案する可変粘弾性アシスト手法が有効であることを示した。次いで、携帯空気圧源での駆動実験では、チューブレスで **Airsist I** が使用可能であることを示した。最後に行ったバックドライバビリティ検証実験では、装置を装着した状態で10km/sでの走行が可能であることを確認し、提案手法が高いバックドライバビリティを有することを示した。

以上より、提案する粘弾性の制御方法が従来手法と比べて高い人体親和性を有していることおよび、新規に開発した携帯空気圧源が従来よりも軽量な構成が可能となることを確認した。今後は提案システムの実用化へ向けた改良および、歩行を含む様々な動作への応用を予定している。そのための改善策としては、さらなる軽量化、消費空気量低減手法の検討、制御機器も含めた **Airsist I** のモバイル化を予定している。

## 「論文審査の結果の要旨」

### I. 論文の主題

空気圧人工筋肉と磁気粘性流体を用いた可変粘弾性アシストシステムと  
そのモバイル化のための空気圧源の開発研究

### II. 当該研究分野における位置づけ

高齢社会による労働力不足への対策として、装着型アシスト装置が多く開発されている。現在開発されている装置のほとんどはモータによる高トルクなアクチュエータにより駆動されているが、人間は筋肉の拮抗配置により「トルク」や「角度」だけでなく「剛性」や「粘性」を変化することで駆動制御されており、モータによる駆動方法は人間の関節とは異なっている。装着型アシスト装置についても、人間と同じ駆動原理を持つアシスト装置を身体と並列に配置することで、より人体親和性の高いアシストが可能であると考えられるが、そのようなアシスト方式は検討・開発されていない。

可変粘弾性特性を実現できる装置として、空気圧人工筋肉と磁気粘性流体デバイス (Magneto rheological fluid device:以下 MR デバイス) を用いた可変粘弾性関節がある。本装置は構造的に可変粘弾性を実現できることが確認されているが、これをそのまま装着型アシスト装置に適用する場合、2つの技術的課題が存在する。一つは、アシストのための制御則の開発、もう一つは空気圧人工筋肉のモバイル化のための空気圧源の開発である。

そこで本研究では、空気圧人工筋肉と磁気粘性流体デバイスから成る可変粘弾性特性を有する装着型アシスト装置の開発を目標とし、アシストに適した粘弾性制御手法の確立と、携帯空気圧源の開発を行うこととした。

### III. 論文の構成 (目次と各章の概要)

■第一章:緒言 近年の労働人口の減少を背景とする装着型アシスト装置の必要性について述べ、可変粘弾性アクチュエーションのアシスト装置への適用が既存の装置の持つ課題の解決法となり得ることを述べた。次いで軸方向繊維強化型人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキで構成される関節構造が可変粘弾性特性を実現できることから、アシストに適した粘弾性制御手法の確立と、その携帯化のための空気圧源の開発を研究目的とした。

■第二章:可変粘弾性アシストシステム 可変粘弾性関節の制御手法について検討し、1自由度膝関節動作支援試作機によるアシスト実験を通してその有効性について確認した。提案する粘弾性制御則は、アシスト動作を角速度と各加速度から運動の開始時、運動の停止時、保持アシスト、脱力の4フェーズに分け、粘弾性の大きさを切り替える手法である。

■第三章:ハイブリッド携帯空気圧源 既存の圧縮空気生成手法の携帯性比較を行い、それぞれの空気圧源の携帯性は一長一短であり最適といえる手法が存在しないことを示した。次いで、比較評価結果に基づいて複数の圧縮空気生成手法を組み合わせるハイブリッド空気圧源を提案した。ハイブリッド空気圧源は、高圧が発生可能であるが供給可能流量が少ない空

気圧源と、発生圧力は小さいが供給流量が大きい手法を組み合わせ、空気圧源の総重量を削減する手法である。

■第四章：可変粘弾性下肢アシスト装具 **Airsist I** 提案する可変粘弾性アシストシステムと携帯空気圧源を備えた **Airsist I** を提案した。 **Airsist I** は従来のアシスト装置よりも軽量で低慣性であり、 **Airsist I** 用ハイブリッド空気圧源は 800NL の流量供給、0.7MPa の供給圧力を 4kg 程度の重量で実現できることを示した。

■第五章：**Airsist I** によるアシスト動作実験 第 5 章では、**Airsist I** を用いた 4 つの動作実験を行い、提案する可変粘弾性制御則と空気圧源の有効性を示した。

■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があげられる。

- ・装着型アシスト装置のための可変粘弾性制御手法を提案・開発したこと。また試作機を用いたアシスト実験により粘弾性を一定とする従来手法よりも身体親和性が高いことを示したこと。
- ・既存の圧縮空気生成手法について携帯性という観点で比較を行ったこと。
- ・新規な空気圧源として、従来よりも軽量な構成が可能なハイブリッド空気圧源を提案したこと。
- ・ハイブリッド携帯空気圧源を有する下肢アシスト装具 **Airsist I** を開発し、スクワット動作をはじめとした実践的な動作においても提案手法の有効性を確認した点。

#### V. 論文の課題

今後、可変粘弾性制御システムと携帯空気圧源のさらなる高性能化および実用化を目指し、以下の課題に取り組む。

1. 歩行をはじめとした様々な動作への応用。
2. 空気圧源を含む可変粘弾性システムのさらなる軽量化。
3. 消費空気量を低減する制御手法の検討。
4. 制御機器も含めたモバイル化。

#### VI. 論文の評価

本論文は新しい手法として、アシスト装置のための可変粘弾性制御手法および、圧縮空気生成手法の携帯性評価に基づくハイブリッド空気圧源について提案した。論文の内容は、基本的な提案手法の評価から、それらを統合した下肢アシスト装置 **Airsist I** の開発・評価等の検討も行っており、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。