

可変粘弾性関節を有するマニピュレータの運動制御  
Motion Control of Variable Viscoelasticity Joint Manipulator

精密工学専攻 戸森央貴

Department of Precision Mechanics Hiroki Tomori

## 1. 研究目的

マニピュレータはハンドを有し、把持した対象物を操作する装置である。その利用分野は多岐にわたり、工業、福祉、宇宙開発、レスキューの場において人の代替として作業することが期待されている<sup>(1)-(3)</sup>。マニピュレータの利用により、人の負担を軽減できるだけでなく、人にとって危険な場所での作業が可能となることから、マニピュレータの需要は今後も増えていくことが予想される。現状のマニピュレータは、一般に限定された役割での利用が想定されており、それを達成するための特性を有するよう設計されている。例えば、工業用マニピュレータは高速に精度良く作業をおこなえるよう、剛性が高くなるよう設計されている。一方、福祉などの人間との協調作業をおこなうマニピュレータには、反対に高い柔軟性が必要とされる。しかし、電動モータや油圧シリンダのようなアクチュエータは構造的に高剛性であり、コンプライアンス制御等により柔軟性を持たせたとしても、突発的な衝突には対応することができない。ところが、マニピュレータに構造的な柔軟性を持たせると、振動を発生するため制御が難しく、また、人を支えるような力を出すのも困難である。

著者らは、これからの社会で人間と密接に関わりながら、協調作業や単独作業をおこなうマニピュレータの開発を目指している。これらは複雑で多様な人間の生活環境の中で働くことになり、人間との接触が従来以上に頻繁に起こると予測できる。そのため、マニピュレータには構造的な高コンプライアンス性が必要である。ただし、腕を柔軟にするのではなく、腕は剛体のまま、人間の筋肉のように関節を駆動するアクチュエータに柔軟性を付与することで、柔軟性と発生力の確保の両立を図る。さらに、これらをうまく活用し、投擲運動や跳躍運動のようなダイナミックな運動の能力をマニピュレータに付与することができれば、これまでの工業用アクチュエータでは難しかったマニピュレータの機動性向上や作業分野の拡張を図ることもできる。

一方で、人間は可変粘弾性特性を有する筋肉によって運動をおこなっている。筋肉は構造的に柔軟であり、不意の衝突や他者との協調作業において撃力や位置誤差を吸収することができる。さらに、筋肉に弾性エネルギーを蓄積し、運動エネルギーとして利用することで通常の運動よりも高い出力を得ることができる。このような出力は緊急時だけでなくパフォーマンスの向上にも利用される。加えて、筋肉の可変粘性特性は運動の制御に寄与している。高コンプライアンス性を有する筋肉が激しい運動をおこなったり撃力を受けたりしながらも、大きな振動を生じずに作業できるのは筋肉の可変粘性によるダンピングのためである。

そこで本研究では、マニピュレータの関節に、空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキによる可変粘弾性特性を付加することを提案する。空気圧ゴム人工筋肉は軽量、柔軟であり、出力も高い。さらに、空気圧の印加によって、変位だけでなく剛性変化を生じる可変剛性特性も有している<sup>(4),(5)</sup>。本研究では、人工筋肉には収縮率や収縮力に優れた軸方向繊維強化型人工筋肉<sup>(6)</sup>(Fig.1)を選択した。ただし、本アクチュエータは空気圧と収縮力、収縮量の間非線形性があるため制御が難しいという課題がある。また、MR ブレーキ(Fig.2)は内部の MR 流体の流動抵抗をブレーキトルクとして用いる装置であり、本流体は磁場の印加により数十ミリ秒単位の高速度で見かけの粘性が変化するビンガム流体である<sup>(7),(8)</sup>。この見かけの粘性変化により高い流動抵抗を示すため、本 MR ブレーキは小型でありながら高いブレーキトルクを発生させることができる。

以上より、本論文では空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキで構成した可変粘弾性特性を有する関節を開発し、その基礎的な制御システムを設計する。次に、開発された関節をマニピュレータに組み込み(Fig.3)、人工筋の弾性を

考慮した制御法を開発し、その有効性を示す。さらに、本関節の可変粘弾性特性を活用し、瞬間的に大きな出力を要する投擲運動を、最適制御手法により実現する。以上のように、粘弾性特性を有する関節、それを組み合わせたマニピュレータの制御手法を開発することで、これまでは実現が難しかった、人間に対して力を伴う支援が可能なロボット、生物に見られる瞬発力を利用した動作が可能なロボットの実現可能性を大いに高めることができる。

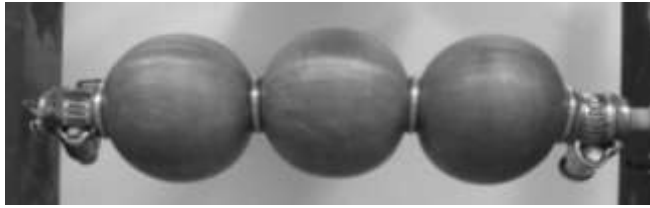


Fig. 1 Straight-fiber-type artificial muscle

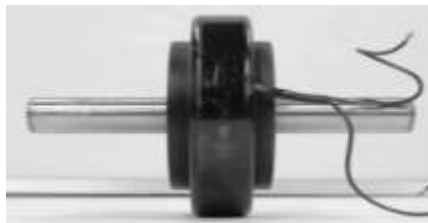


Fig. 2 MR brake



Fig. 3 Valuable Viscoelastic Joint Manipulator

## 2. 研究内容

本研究で開発する可変粘弾性関節の制御系を設計するためには、本関節の持つ特性をモデル化する必要がある。そこで本関節の構成要素である空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキについて特性を調査し、制御に用いるための数式モデルを導出する。さらに、可変粘弾性関節マニピュレータの特性を把握するために動特性モデルを構築し、特性を考慮した制御設計をおこなう。そして、設計した制御により、アームの位置制御、関節の剛性制御がおこなえることを明らかにする。

次に、空気圧ゴム人工筋肉と MR ブレーキを併用することで、アームの振動抑制と応答性の向上を目指す。本関節は弾性を有するため外乱によって振動を生じやすく、応答の遅い空気圧制御では対応に限界がある。そこで、空気圧応答より高速な MR ブレーキによる振動抑制をおこなう。このとき、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、両者の特性を考慮に入れた制御系の構築をおこなう。

そして、次の段階として可変粘弾性関節の特性を活用する運動方法を提案し、マニピュレータの機能を拡張する。本研究では可変粘弾性関節の弾性特性を利用することで、関節にエネルギーを蓄積、解放することで瞬間的な出力の発生を目指す。しかし、この目的のために本マニピュレータの汎用性を損なうことは望ましくないため、著者らは瞬間的な高出力を発生させる専用のシステムを構築せずに、これまでに開発した可変粘弾性関節を利用する。さらに、発生した出力を空気圧制御と MR ブレーキの可変粘性制御によって制御する。

最後に、可変粘弾性関節マニピュレータによるダイナミックな運動の応用として、投擲運動の制御を目指す。人間の投擲運動は関節の出力のみに依らず、多リンク構造によって各関節の運動エネルギーを手先に伝えている。そのため、本マニピュレータを2自由度化し、各関節で瞬間的な出力の発生をおこなう。本研究ではマニピュレータの自由度が増加し、投擲に適した運動を設計するために多くの時間を要する。そのため、シミュレーションと PSO アルゴリズムによる最適制御手法を取り入れ、投擲運動の設計をおこない、実機によって検証実験をおこなう。

### 3. 研究成果

はじめに、関節の構成要素である軸方向繊維強化型人工筋肉と MR ブレーキの特性を調査した。そして、本人工筋肉の非線形性を定式化し、制御に用いることで入出力の線形化をおこなった。そして、MR ブレーキのブレーキトルクを測定し、トルクの大きさは軸の回転速度に対して依存性が低く、クーロン摩擦のような特性であることを明らかにした。

そして、本関節を有するマニピュレータの動特性をモデル化し、マニピュレータ全体としての特性の把握をおこなった。ここで、関節に二本の人工筋肉を拮抗配置させることで、関節の回転運動と剛性の両方を制御する。そのために、先に導出した人工筋肉単体の特性を表す式を関節へ拡張し、各人工筋肉へ入力する空気圧と関節角度、関節剛性の関係を定式化した。また、人工筋肉へ印加する空気圧について、電磁弁の応答、管路内の空気の移動、人工筋肉内の圧力変化、人工筋肉の体積変化を要素毎にモデル化し、これらを統合することで、マニピュレータの特性を再現した。

次に、人工筋の利用に伴うマニピュレータの振動抑制のため、人工筋、MR ブレーキ両者の特性を考慮に入れた制御系の構築をおこなった。本研究では、内部モデル制御を採用し、振動のないマニピュレータの応答を内部モデルとした。この内部モデルの応答と実際のアームの応答を比較し、差をフィードバックすることで人工筋肉の制御をおこなう。さらに、内部モデルからトルクを計算し、実機の負荷トルクとの差を MR ブレーキへの入力トルクとした。これにより、MR ブレーキは人工筋肉で抑制できない高周波振動を抑制することに成功した。また、定常値付近では内部モデルのトルクと実機の負荷トルクが近づくことで MR ブレーキの出力が下がり、人工筋肉の位置制御との競合を抑えた。

さらに可変粘弾性特性による瞬間的な出力を得るため、関節にポテンシャルエネルギーを蓄積、解放する手法を提案した。本手法と、人工筋肉に空気圧をステップ入力する従来手法を比較したところ、本手法ではアームの応答において立ち上がり時間とむだ時間の減少が見られた。また、エネルギーを蓄積したことで大きな仕事率を得ることができた。そして、本手法で生じた運動を制御するために人工筋肉の空気圧制御と MR ブレーキの粘性制御を追加した。その際、MR ブレーキの特性を基に、関節の回転速度を MR ブレーキの入力にフィードバックすることで、可変粘性ダンパのように振舞う制御を適用した。これらによって、瞬間的な出力を発揮しながら、残留振動を抑制した位置決めと剛性制御を同時に実現することに成功した。

最後に、最適制御理論に基づいた投擲運動をシミュレーションによって設計し、実機によって再現した。その際、投擲距離だけでなく様々なパフォーマンスを実現できるよう、評価関数には、関節特性や運動範囲など、多数の評価項目を組み込み、運動の設計には PSO アルゴリズムを利用した。そして、シミュレーション結果では、マニピュレータ肩関節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ていた。また、各関節の剛性と粘性はこの挙動と矛盾しない応答を見せた。そこで、シミュレーションによって得た投擲動作を実機で再現させた。実験結果からは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。

### 4. 結論

まず、軸方向繊維強化型人工筋肉の非線形特性を定式化し、これを用いることで入出力の線形化が可能であること、MR ブレーキの制御特性がクーロン摩擦に類似することを示した。そしてこれらを組み合わせた関節においても、人工筋肉の非線形性を考慮した制御を用いることで、関節角度と剛性の入出力を線形化できることを明らかにした。一方、マニピュレータの動特性モデルにおいて空気圧応答のモデルは計算量が大きく、空気圧応答の影響を考慮するために本モデルを制御に直接適用することは難しいと判断した。

次に関節の位置決め制御では、MR ブレーキと人工筋肉が別々に制御されることで競合し、定常偏差を生じる要因になることを示した。そのために人工筋肉の特性を考慮した MR ブレーキ制御が必要であるとして、内部モデル

制御を設計した。本制御手法は、人工筋肉を駆動源とし、MR ブレーキを振動抑制のために使用するという役割を持たせたもので、これにより可変粘弾性関節の位置制御系の基本が確立できた。

可変粘弾性関節による瞬間的な出力発生の研究では、ポテンシャルエネルギーを関節に蓄積し、そ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。これは可変弾性特性と可変摩擦特性を構造的に有する本関節ならではの駆動手法であり、エネルギーを蓄積することで本来の人工筋肉や電磁弁のスペック以上の出力を発揮することができる。さらに、本来可変トルクブレーキである MR ブレーキを制御によって可変粘性ダンパとして用い、アームの振動やオーバーシュートを抑制することにも成功した。これにより、本関節が本来有する可変弾性、可変トルクブレーキ特性、そして制御によって獲得できる可変粘性を総合的に利用し、関節の出力向上と運動制御が可能であることを明らかにした。

最後に、2自由度マニピュレータによる投擲動作の設計では、関節に蓄積したエネルギーを使うだけでなく、関節同士の力学的な相互作用を導いた。この結果は人間が腱や筋肉にエネルギーを溜め、体幹から手先にエネルギーを伝えることで投擲能力を向上させていることに似ている。これにより、可変粘弾性関節を多リンク構造に適用することで、関節の出力だけでなく技巧的にパフォーマンスを向上できることを示した。また、複雑な特性を有する本関節の動作を設計する際に、PSO アルゴリズムのような発見的近似手法が有効であることを示した。

以上の研究によって、空気圧ゴム人工筋肉と MR 流体ブレーキを用いた関節の特性を明らかにし、本関節の可変粘弾性特性を利用した応答性の向上や運動能力の向上をおこなった。そして、本関節を多リンク構造に適用することで技巧的な運動が可能であることを示した。

#### 参考文献

- (1) 大森康平, 青山佳祐, 山崎芳昭, 遠隔操縦型レスキューロボットの開発-被災者発見用 5 自由度マニピュレータの新規設計と実験評価-, 日本設計工学会研究発表講演会講演論文集, vol. 2014 春季, pp. 103-104, 2014
- (2) 川上幸男, 医療・福祉・災害救助へ向けた新たな利用展開 空気圧シリンダを用いた多関節マニピュレータ, 油空圧技術, Vol. 51, No. 1, pp. 12-16, 2012
- (3) KELKAR Atul G and JOSHI Suresh M, Capture and Control of Unknown Space Objects with Flexible Multi-Link Manipulators, Proc Am Control Conf, Vol. 2014, Vol. 3, pp. 1605-1606, 2014
- (4) T. Nakamura, N. Saga, and K. Yaegashi, Development of Pneumatic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics, in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology (ICIT 2003), pp. 729-734, 2003
- (5) G. K. Klute, J. M. Czernieki, and B. Hannaford, McKibben Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence, Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics 1999, pp. 221-226, 1999
- (6) T. Nakamura and H. Shinohara, Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 2007), pp. 4361-4366, 2007
- (7) B. J. Park, C. W. Park, S. W. Yang, H. M. Kim, and H. J. Choi, Core-Shell Typed Polymer Coated-Carbonyl Iron Suspension and Their Magnetorheology, ERM08, p. 102, 2008
- (8) 中野政身, ER/MR 流体のレオロジー及び流動特性, 可視化情報, Vol. 27, No. 105, pp. 103-110, 2007