

柔らかい弾性腱駆動ロボットの肘ブレーキによる衝撃制御

Impact control of an elastic tendon driven robot arm by using elbow joint brakes

○早川陽太*, 柴原瑞暉*, 水戸部和久*

○ Yota Hayakawa*, Mizuki Shibahara*,
Kazuhisa Mitobe*

*山形大学,

*Yamagata University

キーワード：電磁ブレーキ (Electromagnetic Braking), 腱駆動ロボットアーム
(Elastic Tendon-Driven Robot), ソフトロボット (Soft Robot),
スライディングモード制御 (Sliding Mode Control)

連絡先：〒 992-8510 山形県米沢市城南 4 丁目 3-16

山形大学 工学部 機械システム工学科 6-500 水戸部研究室

早川陽太, Tel.: (090)5863-9966, E-mail: t243515m@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 人と同じ空間で作業できる協働ロボットが多様に製品化され, 工場やサービス現場で普及しつつある[1][2]. 代表例としてユニバーサルロボット社の UR シリーズや KUKA の LBR iiwa などが挙げられる. これら実用機では, 関節に組み込んだトルクセンサや電流センサにより外力や過負荷を監視し, 接触時の安全性を確保している[1][2]. しかし, その基本構造は従来型マニピュレータと同様にギア付きモータと関節単位の PD 制御で構成され, 高い減速比による大きな関節摩擦のため, 関節剛性は常に高い. 一方, ヒトの運動では, 単なる PD ゲイン調整では再現できない滑らかな従動特性が観察される[5][6]. 相手の動きに応じて関節をほぼ自由関節 (受動関節) のように扱いながら柔らかく動く一方で, インパクト動作などでは瞬間的に剛性を高め, 身体の等価質量を増大させている[5][6]. すなわちヒトは, 極めて低剛性から高剛性までを広い範囲で切り替える能力を持っており, これは筋・腱の弾性と粘性を巧みに調節することで実現されていると考えられる. こ

のようなヒト型の柔軟性をロボットに導入するアプローチとして, 筋骨格構造や腱駆動によるロボットが注目されている. 腱の弾性を利用して平衡点を操作し, 粘性によって振動を抑制する原理はモータの PD 制御に類似するが, ヒトのように大きな剛性変化を実現した例は少ない[8][9]. さらに, 腱駆動系は関節摩擦が小さいため, リンク間干渉が大きく, 低剛性のまま安定に動作させるには工夫が必要である.

本研究の目的は, ロボットアームがヒトのように柔らかく従動しながら, 必要な瞬間には高剛性へ切り替え可能な, 弾性腱駆動メカニズムと制御則の構築である. [弾性腱にマイクロ電磁クラッチ (電磁ブレーキ) を組み込み, 見かけの粘性摩擦を高速に切り替え可能な 2 リンク弾性腱駆動ロボットアームを試作した. ゴム紐を弾性要素とし, 巻胴の巻取りで平衡点を操作しつつ, 電磁ブレーキ ON/OFF で粘性を切り替えることで, 低剛性のままリンク干渉を抑え, オーバershootと振動を軽減する制御を可能にする. また, 本研究では第二リンクに「肘ブレーキ」を新たに設け, 土台側ブレーキとの違いを検証し, 関節間のエネルギー流動を利用した高剛性化の可能性を調べる.

2. 弾性腱駆動 2 リンクアームの制御手法

電磁ブレーキを組み込んだ弾性腱駆動ロボットアームのモデル図を Fig. 1 に示す. 本研究で製作した 2 リンク弾性腱駆動ロボットアームは, 各関節にゴム紐を弾性要素とする腱を配置し, その直列部にマイクロ電磁クラッチ (電磁ブレーキ) を組み込むことで, 粘弾性を高速に可変できる点に特徴がある. ゴム紐 (チューブ) は材質・長さを容易に変更でき, 低い剛性を広い範囲で設定しやすい. 一方, 電磁ブレーキは入力電圧を PWM 信号として駆動し, 摩擦力すなわち見かけの粘性を高速に調整できる [3]. 摩擦による外部仕事は電力に依存しないため低消費電力で大きな見かけの粘性を実現できる. この弾性要素と粘性要素を切り替えることで, ヒトの腕のように低剛性での従動運動と, 瞬間的な高剛性化を同一機構で両立することを目指す.

本アームの腱駆動系は, 巻取り装置と電磁ブレーキの分担により構成される. 巻取り装置はゴム紐の自然長を変化させることで平衡点を操作し, 電磁ブレーキは粘性係数を切り替えることで振動抑制・減衰・位置決めを担う. 関節には減速機や高摩擦要素を設けず, 角度および角速度は関節軸センサではなくリンクに搭載した IMU により計測する. 計測値はモータではなくブレーキに直接フィードバックされ, 運動の発生 (平衡点操作) はモータ, 運動の整形 (減衰・停止) はブレーキが担当する点が本研究の重要な設計思想である.

電磁ブレーキ OFF 時, アームはゴム紐の弾性のみに支配され, 低剛性・低摩擦のため強いリンク干渉と振動が現れる. 一方, 電磁ブレーキ ON 時にはブレーキの粘性が支配的となり, 運動は急速に減衰する. これら 2 つの運動モードを切り替えることで, 位相平面上に設定した目標軌道

$$\omega = -\lambda(\theta - \theta_d)$$

へ状態を収束させるスライディングモード制御を構成する. ここで, ω はアーム角速度, θ , θ_d はアーム角およびその目標値, λ は目標軌道の傾きを与える設計パラメータである. 状態が軌道より上側にある場合はブレーキ ON (粘性モード), 下側にある場合はブレーキ OFF (弾性モード) とすることで, 低剛性のまま振動を抑えた運動が実現できる. 2 リンクに対してそれぞれ独立に位相平面を定義し, ブレーキを軸ご

とに切り替えることで, リンク干渉を抑制しながら同時制御を行う.

第 2 リンクの駆動モータをベース付近に配置しアーム全体を軽量化できることは腱駆動方式の利点の一つである. 第 2 リンクとベースの間に駆動トルクを発生させるパラレル駆動方式が一般的である. パラレル駆動では第 2 リンク関節をベースとの相対角で制御するため, 運動学が簡単になる. 一方で, 衝突時にロボット全体の等価質量を大きくするためには, 第 1 リンクと第 2 リンクの間の肘関節をブレーキでロックする必要がある. そこで, 本研究では, 第 2 リンクにおいて土台側ブレーキに加え, 肘ブレーキを設計・導入した. 肘ブレーキは, 第 2 リンクの間中部に配置され, 腱張力をリンク内部で直接受け止める構造を持つ. 土台側ブレーキが腱全体に対する粘性付与を担うのに対し, 肘ブレーキは第 2 リンク局所における運動拘束を可能とする. この局所拘束により, 第 2 リンクの角速度を急速に減速させ, 腱系に蓄積されている弾性エネルギーや巻取りによる張力を, 第 1 リンク側へ優先的に伝達することができる. すなわち, 肘ブレーキによってリンク間のエネルギー流動を切り替え, 瞬間的に第 1 リンクの駆動力を増幅することが可能となる [3] [5] [6] [13]. この機構は, ヒトが肘関節を固めることで肩側の推進力を高める運動戦略と類似しており, 柔らかさと高剛性化を状況に応じて切り替える. 以上より, 肘ブレーキは単なる減衰要素ではなく, リンク間の力学的結合を調整し, 必要な瞬間にアーム全体の剛性を高めるための有効な手段となる. 以上の構成により, 本研究の 2 リンク弾性腱駆動アームは, 低剛性域でも振動を抑制しつつスムーズなリーチング動作を達成し, さらに局所的な高粘性化やリンク固定機能を活かした制御を目指す.

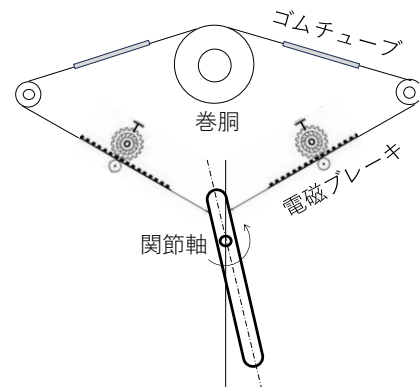


Fig. 1 Schematic diagram of the tendon-driven robot arm

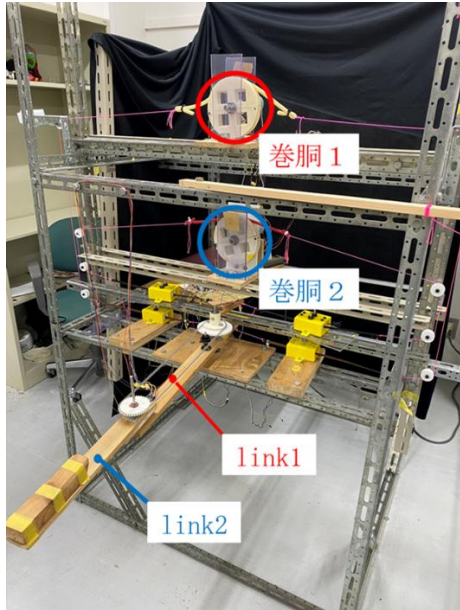


Fig. 2 2-Link 2-DOF Robotic Arm

3. 衝撃制御実験

1. 土台ブレーキと肘ブレーキのスライディングモード制御

第 2 リンクに搭載した肘ブレーキを用いた場合と、土台側ブレーキを用いた場合でのスライディングモード制御の性能を比較する。本実験では、肘ブレーキのみで制御した場合、土台ブレーキで制御した場合、ブレーキ制御なしの場合の 3 条件を比較し、肘ブレーキの有効性を明らかにする。2 リンクアームを初期角度から目標角度へ移動させる単関節運動を対象とし、第 2 リンクに対してスライディングモード制御を適用した。肘ブレーキ使用条件では、肘関節に設置した電磁ブレーキのみを ON/OFF 切り替えし、土台ブレーキは常に OFF とした。同様に土台ブレーキ条件では土台側のブレーキのみを用いた。制御なし条件では電磁ブレーキを一切作動させず、ゴム紐の弾性のみにより応答させた。位相平面（角度-角速度）上に設定した目標軌道に対し、状態が軌道上側に位置するときブレーキ ON、下側ではブレーキ OFF とするスライディングモード則を用いた。角度・角速度はリンク搭載 IMU により計測した。Fig. 3 に制御なし、Fig. 4 に土台ブレーキ制御、Fig. 5 に肘ブレーキ制御の条件で得られた位相平面軌道および角度の時間応答を示す。

制御なしでは弾性による一次振動が顕著であり、減衰が遅くオーバーシュートも大きい。土台ブレーキ制御では振動は大幅に抑制され、目標軌道への収束が良好である。

肘ブレーキ制御でも土台ブレーキと同等に目標軌道に沿った滑らかな収束が得られ、制御なし条件に対して顕著な振動抑制が確認された。肘ブレーキは土台ブレーキと異なり、リンク局所に粘性を直接付与する構造であるが、位相平面上の軌道追従性能は同等であった。以上より、新たに設計した肘ブレーキ単独でもスライディングモード制御を成立させられることが確認できた。

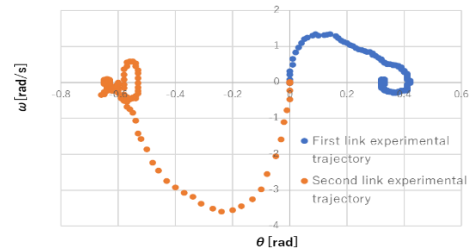


Fig. 3 Step response without control (Baseline condition)

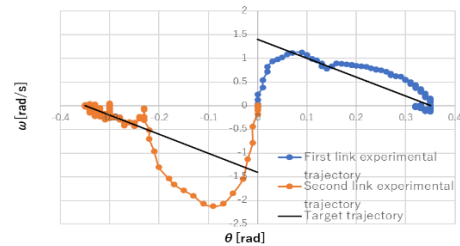


Fig. 4 Sliding mode control using base brake

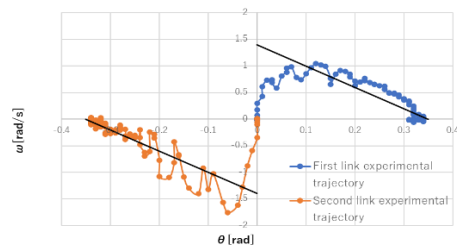


Fig. 5 Sliding mode control using elbow brake

2. 衝突実験

2 リンクアームの手先が外部物体と衝突した際に、肘ブレーキが衝突をどのように変化させるかを評価する。特に、衝突前にブレーキをかける場合と衝突瞬間にブレーキをかける場合で、衝突後のボール変位量がどのように変化するかを比較する。

ロボットアーム正面から見て左側に 45° 方向へゴム製ボールを吊り下げ、右側 45° 方向から第 2 リンクを旋回させてボールに衝突させた。衝突時のボール変位はカメラで撮影し、画像上で変位を赤線で明示した。

肘ブレーキに関する条件として以下の 5 条件を設定した。

1. 肘ブレーキなし（基準条件）
2. 衝突前に肘ブレーキ 50% を印加
3. 衝突前に肘ブレーキ 100% を印加
4. 衝突瞬間に肘ブレーキ 50% を印加
5. 衝突瞬間に肘ブレーキ 100% を印加

衝突前印加条件では、ボールへの接触直前の一定時刻でブレーキを ON にし、関節の角速度を事前に減衰させた。衝突瞬間印加条件では接触タイミングでブレーキ ON とした。

Fig. 6～Fig. 11 にボール変位量の比較結果を示す。基準とする肘ブレーキなしの条件と比べて衝突前にブレーキを印加した条件（50%, 100%）では、ボール変位量が減少し、特に 50%印加の場合は最も小さい変位量となった。衝突瞬間のみブレーキ印加条件では、ボール変位量は基準条件よりむしろ増加する傾向が見られた。衝突前に肘ブレーキを印加した条件では、肘関節の角速度が事前に強く減衰されるため、衝突直前の運動エネルギーが低減し、その結果ボールの変位量が小さくなったと考えられる。

一方、衝突瞬間にのみブレーキを印加した場合は、ブレーキ ON の応答遅れにより衝突速度が十分に低減されず、逆に衝突後の運動に対して急激な粘性変化が付与されることでボール方向への力が増幅される可能性がある。以上より、肘ブレーキは衝突瞬間の肘先の固定によってアームを高剛性化して一時的な衝突力を生み出せることが確認できた。また、衝突前のブレーキによるアームの減速によって衝突安全性を高める効果があることも確認できた。

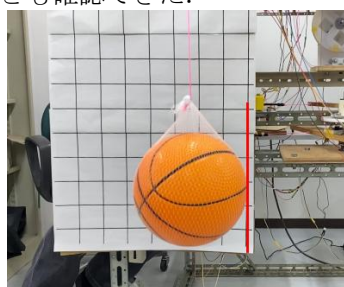


Fig. 6 Experimental setup before collision

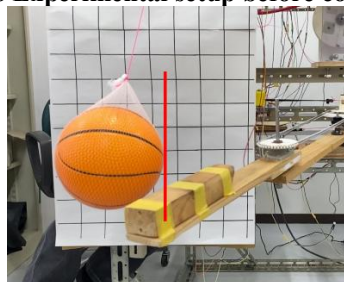


Fig. 7 Collision response without elbow brake

(baseline condition)

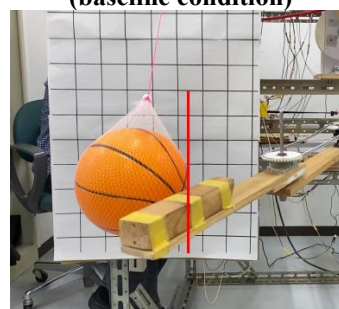


Fig. 8 Collision response with elbow brake 50% applied before impact

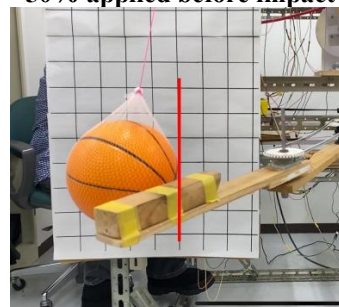


Fig. 9 Collision response with elbow brake 100% applied before impact

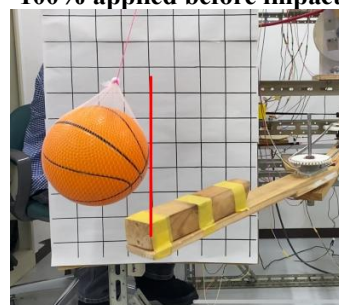


Fig. 10 Collision response with elbow brake 50% applied at the moment of impact

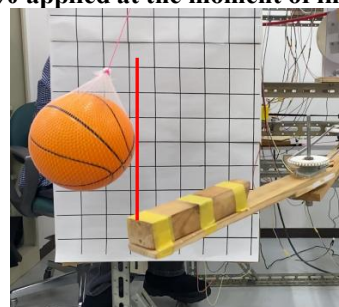


Fig. 11 Collision response with elbow brake 100% applied at the moment of impact

4. 結言

本研究では、ロボットアームがヒトのように柔軟かく従動しつつ、必要な瞬間に高剛性へ切り替え可能な弾性腱駆動メカニズムを実現するため、第 2 リンクに「肘ブレーキ」を導入し、土台側ブレーキとの違いを検証し、関節間のエネルギー流動を利用した高剛性化の可能性を調べた。肘ブレーキ単

独でもスライディングモード制御が成立し、振動抑制および目標軌道への収束が土台ブレーキと同等に得られることを確認した。さらに衝突実験では、肘ブレーキを衝突前に作動させることでリンクを局所的に固定し、アーム全体を瞬時に高剛性化でき、衝突力や運動エネルギーの流れを操作可能であることが確認できた。今後の展望として、広範囲の可変剛性をさらに実現するため、ブレーキ応答の高速化、巻取り装置の低遅延化、腱経路の左右対称化など装置面の改良を進める。また、複数ブレーキを協調的に最適切替する制御の実現を目指す。

5. 参考文献

- [1] Universal Robots, UR Series Product Documentation.
- [2] KUKA, LBR iiwa Technical Overview.
- [3] J. W. Davis and J. D. G. Oetomo, "Clutched Elastic Actuators," IEEE Trans. Robotics, 2013.
- [4] N. Paine, S. Oh, and L. Sentis, "High-performance Series Elastic Actuators," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2014.
- [5] R. Putnam, "Sequential motions of body segments in striking and throwing skills," Journal of Biomechanics, 1993.
- [6] K. Hirashima et al., "Kinetic chain of the upper limb in baseball pitching," Journal of Applied Biomechanics, 2008.
- [7] T. Bhattacharjee et al., "Tendon-driven Robots: A Comprehensive Survey," IEEE RA-L, 2020.
- [8] C. Della Santina et al., "Variable Stiffness Actuators: The Quest for Human-like Stiffness," Annual Reviews in Control, 2019.
- [9] K. Mizushima et al., "Bi-stiffness Actuator for Impact Tasks," Robotics and Autonomous Systems, 2020.
- [10] H. Hirukawa, "Musculoskeletal Structure and Control for Humanoid Robots," JRSJ, 2010.
- [11] I. Yoshida, "Stiffness Control of Continuum Robots," JRSJ, 2015.
- [12] K. Tomita et al., "Development and Evaluation of Series Elastic Actuators," JRSJ, 2007.
- [13] H. Hara et al., "Energy Transfer and Muscle Synergy in Two-joint Arm Movements," SICE Journal, 2021.