

マイクロ電磁クラッチによる ソフトロボットハンドの腱駆動制御系

Electromagnetic clutch based controller for a tendon driven soft robot hand

○神津貫太*, 水戸部和久*

○Kanta Kozu*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード : ソフトロボットハンド (Soft robotic hand) 腱駆動ロボットハンド (Tendon driven robotic hand)
電磁クラッチ (Electromagnetic clutch) ポスチャ (Hand posture control) 把持 (Grip 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 機械システム工学専攻 6-500 水戸部研究室
神津貫太, Tel.: (0238)26-3230, E-mail: t223287m@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

ソフトハンドはロボットを人間環境に応用するために、柔軟物や変形する（力により変形する）対象物のマニピュレーション能力が必要である。

これまでに、個々の対象物に特化した多様なグリップが開発され、さまざまな作業に応用されている^{1, 2, 3, 4}。これらのソフトグリップは、対象物の把持を主な目的としている。一方で、人間のような器用さとコンプライアンスを持つハンドを目指す研究もある^{5, 6}。人間型の多指ハンドでは、各指に対して多関節ロボットマニピュレータの運動学や制御手法を応用することが可能であり、理論が整備されている⁷。しかし、実装手段までを考えると、各関節のセンシングと制御、物体把持状態での拘束運動の計画と制御など、システム全体は大規模で複雑になる。

人間の手では自由度が高い関節や骨格をとりまく組織の柔らかさが、重要な機能をもつ様に思われる。また、動力源となる複数の筋が完全に独立に振る舞

うのではなく、作業に応じて連動して動作する⁸）。

本研究では、このような人間的な機能を実装する 1 方法として、ワイヤ駆動ロボットハンドを製作した。回転軸まわりの 1 自由度を持つ機械的な関節ではなく、スポンジ材で関節を構成した。複数のワイヤを連携させながら簡便に制御するメカニズムとしてマイクロ電磁クラッチを用いた駆動系を考案した。作業に対応するクラッチを制御することで、ジェスチャと把持作業が実現できる。マイクロ電磁クラッチの保持力はコイルへの印加電圧で制御できるため、クラッチの滑りを利用して対象物になじみながらの受動的な把持が可能である。この制御システムは 1 つの DC モータで 5 指を制御できるので、駆動系を大幅に小型化できる可能性がある。

本論文では、制御システムの構成と実装、動作実験の結果を報告する。

2. ハンド及びコントローラの構成

2.1 試作機概要

Fig. 1 に試作したソフトロボットハンドの概要, Fig. 2 に駆動部の概要を示す. 単一のモータに対して, 25 個の電磁クラッチが連結されている. この中から必要なクラッチを選択し, シナジーのように連動して目的の動作を行う.

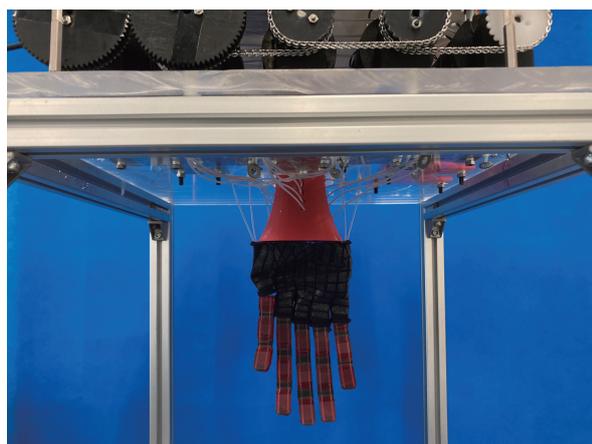


Fig. 1 Overall view of the prototype.

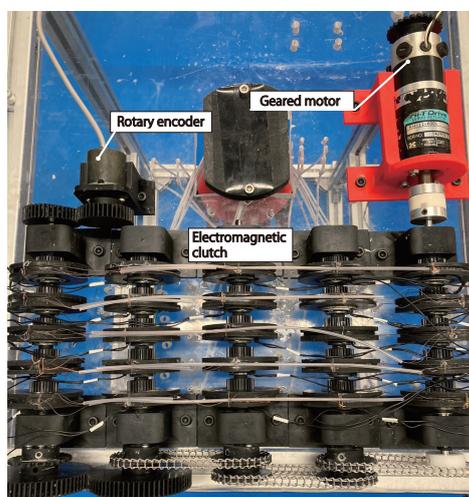


Fig. 2 Overall view of the drive unit. Driven by a single motor and 25 electromagnetic clutches.

2.2 腱駆動方式

Fig. 3 にワイヤによる指の屈曲方式を示す. ワイヤを巻き取ることでスポンジ材が関節となり指が屈曲する. ワイヤはナイロン製の直径 0.23mm の釣り

糸を使用し, 各指の腹は光硬化性樹脂を使用し光造形 3D プリンタで製作した. 指の屈曲状態はワイヤ端の指部品への取付位置により変更できる. Fig.4 には腱駆動方式を用いた指の動作として, ワイヤの取付点の違いによる 4 つの動作を示す.

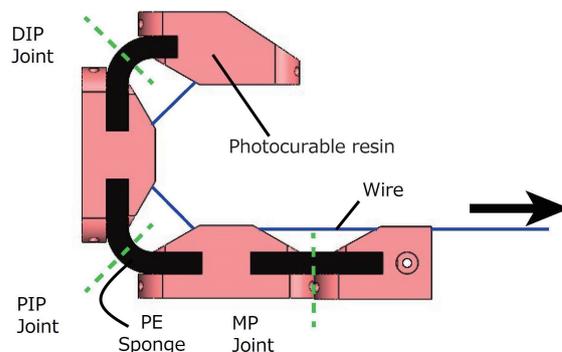


Fig. 3 Finger flexion wire and soft joints.

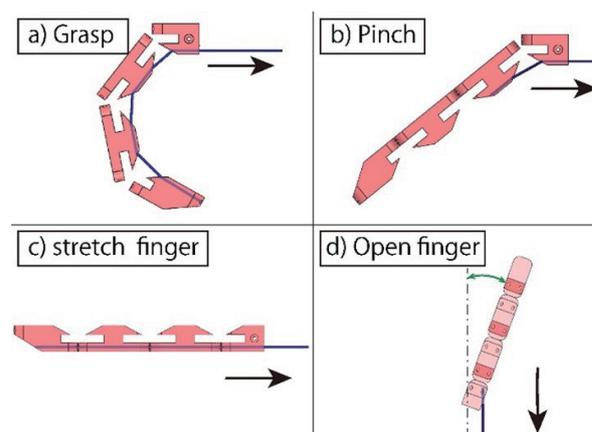


Fig. 4 Finger postures corresponding to 4 different wire attachment point.

2.3 マイクロ電磁クラッチによる駆動系

Fig.5 に電磁クラッチを経由したワイヤ駆動システムの駆動系を示す. 駆動モータは1つで, その出力軸にワイヤの巻胴が複数接続されている. 図中には2本の指のみ示した. 巻胴とモータ回転軸の接続を巻胴毎の電磁クラッチにより制御する. 多くの巻胴が回転軸を共有するので, 1つのモータでポスチャと把持のための巻胴駆動が可能である. 電磁クラッチは OA 機器で用いられるマイクロ電磁クラッチ (JC-338) である. モータ軸の回転量をロータリーエンコーダにより検出する. コントローラからの直接

の指令信号は、モータへの入力電圧、電磁クラッチの制御信号である。クラッチの制御信号は、単純なON/OFFの他に、電圧を変化することでクラッチの保持トルクを調整することも可能である。より小型のモータと電磁クラッチを用いて、前腕リンク内に駆動系全体を組込むことも課題のひとつである。

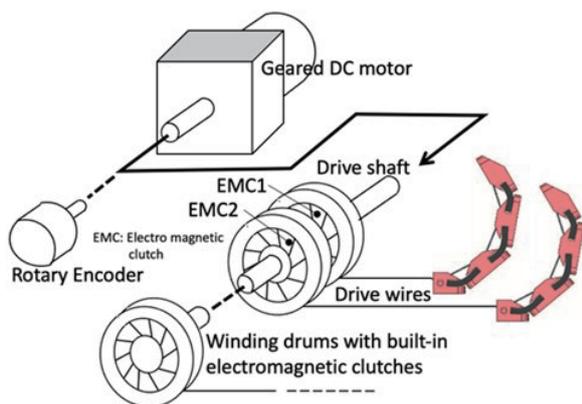


Fig. 5 Connection of drive motor shaft to wire winding drums through macro electromagnetic clutches.

3. ポスチャと把持制御

3.1 クラッチの ON/OFF によるポスチャ制御

ポスチャ制御では、目的とするポスチャに対応するワイヤの目標巻取り量がそれぞれのワイヤに対して決められている。モータ軸の回転量に合わせてワイヤ巻胴の接続によりワイヤ変位を制御する系のブロック線図を Fig.6 のとおり表すことができる。モータ軸の回転位置決め制御はロータリーエンコーダにより可能だが、ポスチャ制御はモータ軸ではなく、ワイヤ巻胴の位置決めで行う。モータ軸の回転量に合わせたクラッチのタイミング制御によりポスチャが実現できる。電磁クラッチ EMC1, EMC2 への制御信号はクラッチの ON/OFF を HI, LO で指令する。巻胴の回転量は、クラッチが ON となっている時間帯のモータ回転量なので、この間の回転角速度を時間で積分した値である。ブロック線図ではクラッチはモータ軸の角速度を ON/OFF するスイッチとして表現した。モータ軸の回転量、クラッチのタイミングのタイムチャート例を Fig.7 に示す。電磁クラッチ

の2つを EMC1 および EMC2 とし、それらに対応するワイヤの巻胴角度を、 θ_{D1} および θ_{D2} とする。モータ軸の角速度 ω_m が一定とすれば、クラッチが ON の時間長さ ΔT_1 , ΔT_2 と巻胴角の関係は簡単に次式で表される。

$$\theta_{D1} = \omega_m \Delta T_1 \quad (1)$$

$$\theta_{D2} = \omega_m \Delta T_2 \quad (2)$$

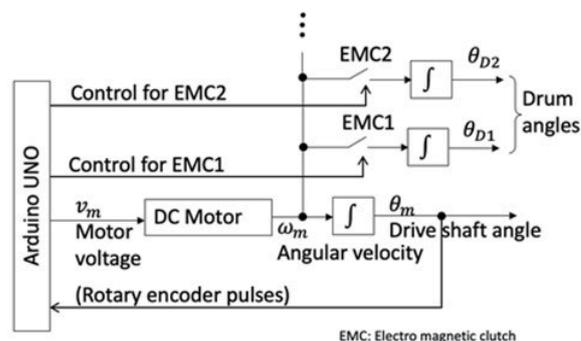


Fig. 6 Block diagram of posture control system.

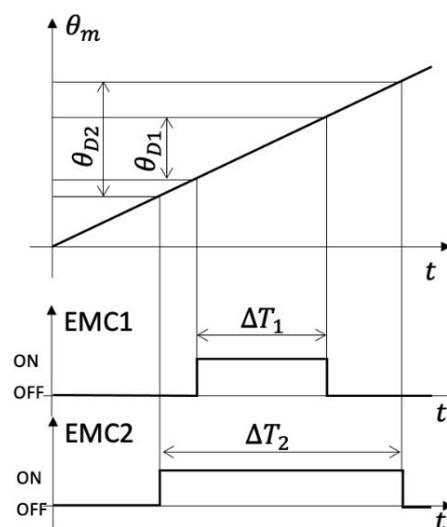


Fig. 7 Winding drum angle control by clutch timing.

Fig.8 では2つのポスチャを行った。Fig.4 で示した動作を組み合わせることで目的の動作を実現することができる。



Fig. 8 Two types of posture.

3.2 クラッチ摩擦による把持制御

電磁クラッチの機能を有効に利用して、指が対象物を押し付けながら対象物形状になじむ把持制御を試みた。その際、対象物形状の認識は行わずに把持する。電磁クラッチの最大保持トルクは入力端子への印加電圧で調整できる。クラッチを ON にして巻胴によりワイヤを巻き取る途中で指が対象物に接触するとワイヤ張力が大きくなる。巻胴の摩擦トルクが最大保持トルクを超えるとクラッチの滑りが生じる。最大保持トルクをクラッチへの入力電圧により調整し、把持力を制御する。Fig.9はクラッチが滑る状態でのモータ軸速度、巻胴の保持トルクの関係を表した。保持トルクにはモータ軸の速度も影響すると考え、クラッチへの入力電圧により粘性摩擦係数を調整するとしてモデル化した。クラッチの摩擦トルクが十分に大きい場合、最大保持トルクはモータの最大トルクを与える。

Fig.10に9つの対象物の把持を行った写真を示す。クラッチの滑りを利用して対象物になじみながらの受動的な把持が可能である。このメカニズムを示した図がFig.11である。電磁クラッチに電圧が印加されると、モータの回転と共にワイヤを巻取り始め、指が屈曲する。その後、対象物に指が接触すると、電磁クラッチが滑り始め、ワイヤの巻取りが終了する。そのため、広い形状範囲の対象物に対して同様になじみながら把持を行うことが可能である。

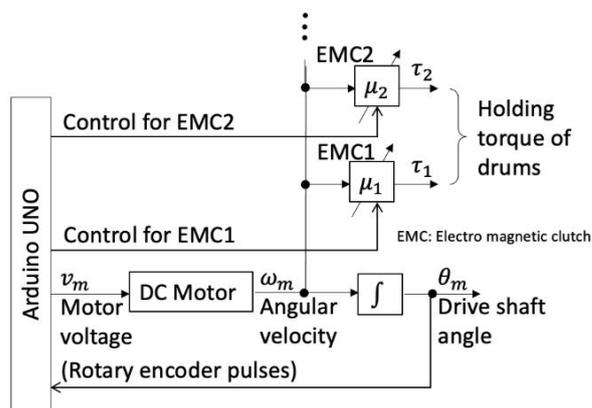


Fig. 9 Block diagram of grasp control system.

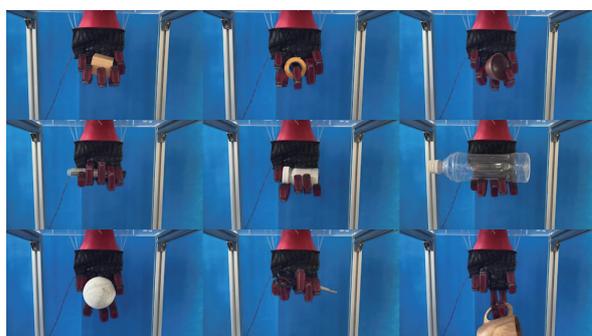


Fig. 10 Grasping results for 9 objects.

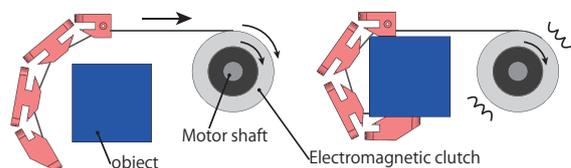


Fig. 11 Mechanism of grasping an object by using sliding friction of the electromagnetic clutch.

4. 伸展時の振動を考慮した駆動系の改良

本試作機では、指の伸展は関節部のスポンジの形状復帰及び指の重力に依存している。電磁クラッチの解放時にはワイヤが弛んだ状態となり、Fig.12のように振動が発生する。指の伸展方向への動作時においてもワイヤによる制御が継続的に必要であることが分かった。そこで、以下のように駆動系を改良した。

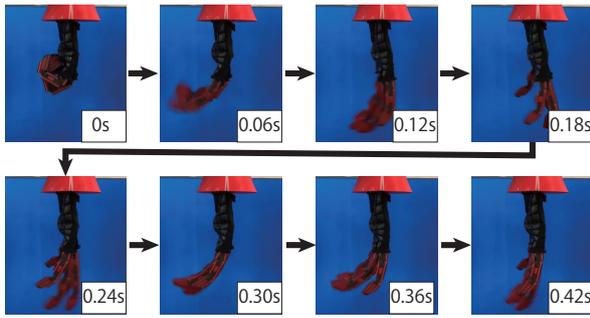


Fig. 12 Vibratory motion during finger extension.

Fig.13に改良した駆動系を示す。各指のワイヤ巻胴はこれまで屈曲時用のみであったが、改良した駆動系では屈曲時用と伸展時用の2つの巻胴を用いることにした。それらを指の屈曲動作と伸展動作で選択して使う。モータ軸の回転方向を平歯車により反転させた駆動軸を新たに追加して伸展時用の巻胴駆動軸とした。モータ数は1つのままである。各巻胴への接続は改良前と同様に電磁クラッチにより制御した。このモデルのメカニズムをFig.14に示す。まず、clutch1のみ電圧を印加することで、半時計回りに軸が回転し、ワイヤが巻き取られ、指が屈曲する。その後、clutch1の遮断しclutch2に電圧を印加することで、時計回りに軸が回転することで指が解放される。このメカニズムによって、指の解放動作も制御することが可能になる。

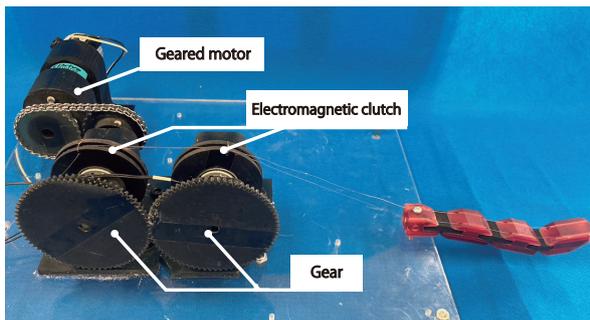


Fig. 13 Improved drive system by adding a reverse winding drums.

Fig.13のモデルをFig.1の本試作機に実装し、動作実験を行った。実験の様子をFig.15に示す。Fig.12の改良前と比較すると、指の伸展時の振動が大幅に改善された。したがって、指の解放時の制御も実現可能になった。

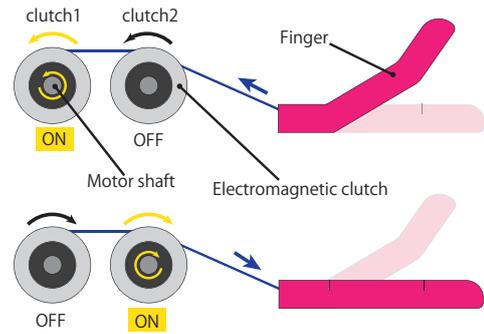


Fig. 14 Driveline model with 2-in-line electromagnetic clutch.

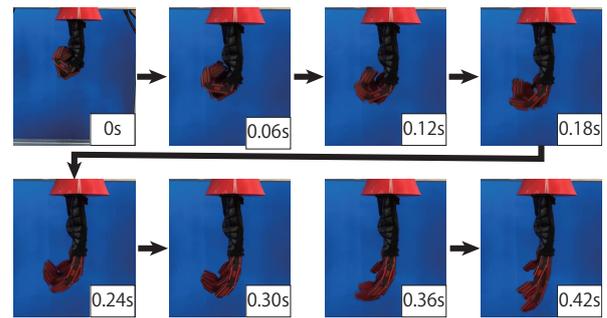


Fig. 15 Finger extension result using the improved system.

5. 結言

本論文では、マイクロ電磁クラッチでワイヤの巻き取りを制御する、ソフトロボットハンドの制御システムを提案した。本システムでは単一のモータによりジェスチャ制御および多様な形状の物体把持制御が可能である。ジェスチャ制御はクラッチの接続タイミングをモータの回転量に合わせて計画することで制御できる。また、クラッチのすべりを利用して、対象物形状になじませながらの把持制御が可能である。クラッチの追加により駆動ワイヤの巻取り方向をスイッチすることにより、メカニズムを追加することで開放時の振動を抑制して、よりなめらかな動作を実現した。

以下、今後の課題点を挙げる。あるジェスチャから別のジェスチャへの遷移には基準姿勢への原点復帰が必要な場合がある。遷移可能なジェスチャの範囲は理論的に導出可能と考えられる。また、親指のCM関節を搭載すれば、今回把持を行った対象物よりも小径なものを「つまみ」により把持可能と考え

られる。把持力のより繊細な制御は、クラッチへの印加電圧の制御により可能と考えられるため、検討したいと考えている。

参考文献

- 1) J. Zhu et al., “Robotic manipulation planning for shaping de-formable linear objects with environmental contacts,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **vol. 5** no. 1, 16/23 (2019)
- 2) Z. Hu et al., “3-D deformable object manipulation using deep neural networks,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **vol. 4** no. 4, 4255/4261 (2019)
- 3) A. Cherubini et al., “Model- free vision-based shaping of deformable plastic materials,” *Int. J. Robot. Res.*, **vol. 29** no. 14, 1739/1759 (2020)
- 4) H. Liu et al., “The MUSHA hand II: A multi-functional hand for robot-assisted laparoscopic surgery,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, **vol. 26** no. 1, 393/404 (2021)
- 5) C. Della Santina et al., “Dexterity augmentation on a syn-ergistic hand: The PISA/IIT SOFT-HAND+,” in *Proc. 2015 IEEE-RAS 15th Int. Conf. Humanoid Robots* no. 7, 265/270 (2017)
- 6) S. Abondance et al., “A dexterous soft robotic hand for delicate in-hand manipulation,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **vol. 5** no. 4, 5502/5509(2020)
- 7) 有本卓, 柔軟ロボットハンドの力学と制御, 新版 ロボットの力学と制御, 8章, 朝倉書店
- 8) 関和彦, 筋シナジーと制御の解説, 計測と制御 **vol. 61** no. 4, (2022)