

東京大学

筋肉のリングでしなやかに動く多関節ロボット ——筋肉で動く多関節グリップや蛇型ロボットを実現——

発表のポイント

- ◆本研究では、筋組織の培養法の改良とC型アンカーの導入により、従来は小刻みなピクピク運動（単収縮）にとどまっていた筋肉リングを、より大きく持続的な収縮（強縮）で動かせるようにしました。
- ◆強化された筋肉リングを直列・並列に組み込むことで、卓上サイズのグリップが物体を持ち上げ、3つの関節を備えた蛇型ロボットが波打ちながら前進するなど、リング形態では世界で初めて多関節をしなやかに駆動できることを実証しました。
- ◆本培養法は、培養筋組織の中でも特に安定的に作製できる筋肉リングの収縮力向上を実現する技術であり、バイオハイブリッドロボットへの応用のほか、筋肉を対象とした薬物試験モデルなど医療・創薬分野まで含めた幅広い応用が期待されます。



筋肉のリングで動く多関節グリップ（左）、ヘビ型ロボット（右）

概要

東京大学大学院情報理工学系研究科の竹内昌治教授と森田智博学振特別研究員らの研究グループは、リング状に成型された培養筋組織（筋肉リング）（図 1A）を用いて、“連続的で力強い収縮（強縮）”や“関節ごとのしなやかな運動”を行う多関節構造のバイオハイブリッドロボットを作ることになりました。

研究チームは、細胞と混合するハイドロゲルの割合を減少させるとともに、培養時に使用する柱構造の剛性を高めることで、筋肉リングの中で細胞同士の融合を向上させました。その結果、高い周波数の電気刺激で強縮を得ることが可能になりました（図 1B）。また、筋収縮をロボットの動きに伝えるアンカーの構造をC型にした結果、筋肉リングの収縮力をロボットの動きへ効率よく伝え、関節ごとの駆動量を向上させることに成功しました（図 1C）。



図 1: リング状に成型された骨格筋組織（筋肉リング）と収縮運動の様子。(A) 筋肉リングの全体像。(B) 筋肉リングに対して異なる電場周波数を印加した際に得られた収縮力。電場周波数が 5 Hz 以下を単収縮（Twitching）、10 Hz 以上を強縮（Tetanus）としており、強縮条件下で連続した高い出力を得られている。(C) 筋肉リングと C 型フックアンカーを統合したアクチュエータに電気刺激を与えて駆動させているときの様子。

最終的に、このユニットを直列・並列に組み込んだ結果、卓上サイズのグリッパが物体を把持したり、3 つの関節を持つ蛇型ロボットが波打つように前進する動作を示し、筋肉リングによって多関節ロボットの制御が可能であることを実証しました（図 2）。

従来、筋肉リングは培養筋組織の中でも特に安定的に作製しやすいことから、ロボットのみならず、筋肉を対象とした薬物試験モデルとしても広く利用されてきました。本培養法は、筋肉リングの成熟度と収縮特性を向上する技術であり、バイオハイブリッドロボットへの応用はもとより、医療・創薬分野における活用も期待されます。

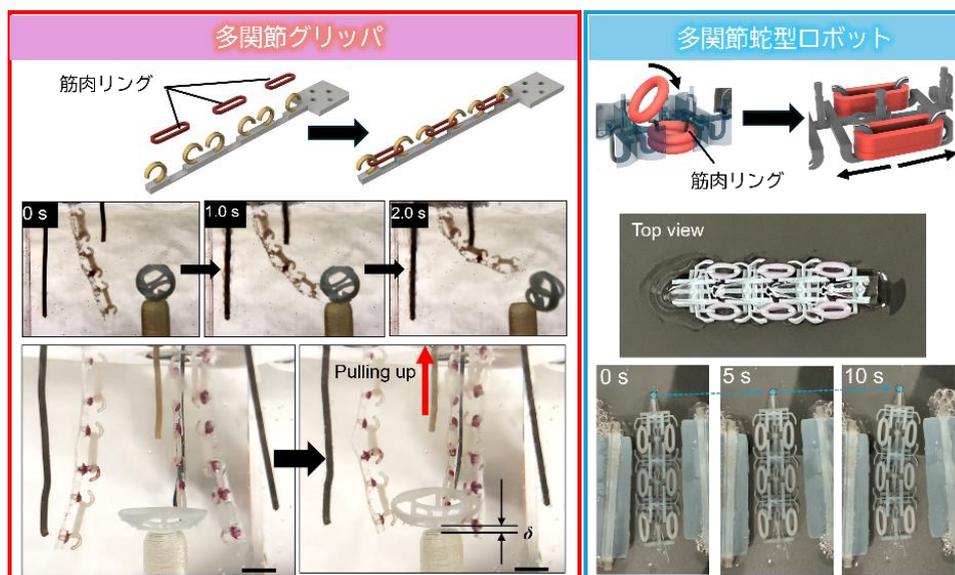


図 2: 本研究で開発したバイオハイブリッド多関節ロボット。左は多関節グリッパであり、直列に接続された筋肉リングの収縮運動によってグリッパの一部でボールを押し出している様子（中段）、さらにグリッパによって物体を把持し持ち上げている様子（下段）を示している。右は多関節蛇型ロボットであり、全体像（中段）と波状前進運動の様子（下段）を示している。

発表内容

骨格筋組織（注 1）は、外部環境への適応性と高い収縮性を兼ね備えていることから、バイオハイブリッドロボット（注 2）の駆動源に応用されてきました。特に、リング状に成型された骨格筋組織（以下、筋肉リング）（注 3）は、ピンセットなどを用いた取り扱いが容易であり、人工物との高い統合自由度を有するため、これまでにバイオハイブリッドロボットの駆動源に広く活用されてきました。しかし、従来の筋肉リングを用いたバイオハイブリッドロボットは、低周波（5 Hz 以下）の電場刺激による小刻みなピクピク運動（単収縮）によって駆動するものに限られており、持続的で力強い収縮（強縮）を必要とする応用には適していませんでした。

そこで本研究では、細胞と混合するハイドロゲルの割合を減少させるとともに、培養時に使用する柱構造の剛性を高めることで、筋肉リングの中で細胞同士の融合を向上させました。これにより、20 Hz の電気刺激でも筋組織が連続的に力強く動く「強縮」運動が可能になり、収縮力は単収縮時と比較して約 1.5～2 倍高い値を示しました。

さらに、筋肉リングを保持するアンカーに C 字型構造を導入することで、収縮に伴う筋肉リングの変形を誘導し、力を効率よく取り出せるようにしました。また、筋肉リングと C 型アンカーの組み合わせを直列に複数連結して多関節構造としたことで、象の鼻のようなしなやかな動きが可能となり、強縮運動を利用した大きな屈曲動作を実現しました。

最終的に、これらの多関節構造のアクチュエータを複数本用いてグリップ型のロボットを試作し、筋肉リングに持続的な収縮力を発揮させることで、お椀型の物体を持ち上げることに成功しました。また、筋肉リングを用いて蛇型ロボットを組み立て、各関節を連続的に駆動させることで、蛇のように波打ちながら前進するロボット動作を達成しました。

これらの成果は、高度かつしなやかな運動制御を実現するための戦略を提示するものであり、バイオハイブリッドロボットの応用範囲を拡大するための重要なステップであるといえます。また、筋肉リングは培養筋組織の中でも特に安定的に作製できることから、これまで筋肉を対象とした薬物試験モデルとしても広く利用されてきました。本培養法は、筋肉リングの成熟度と収縮特性を高める技術であり、バイオハイブリッドロボットへの応用はもとより、創薬分野や医療分野における活用も期待されます。

特に注目すべき成果として以下が挙げられます。

- ◆連続的に力強い収縮運動を実現する筋肉リングの培養方法：細胞同士の融合を高め、高周波数の電場を与えた際に高い収縮力を実現するための培養方法を考案
- ◆C 型アンカーと筋肉リングの組み合わせ構造：筋組織とアンカー間の効率的な動力伝達を実現
- ◆多関節ロボットの構築と駆動：筋肉リングを駆動源とする多関節ロボットの構築方法としなやかな動作の実現

○関連情報：

「プレスリリース①世界最大！筋肉で動くバイオハイブリッドハンド」（2025/2/13）

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0114_00061.html

「プレスリリース②世界初！筋肉で動く二足歩行ロボット」（2024/1/27）

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0114_00036.html

「プレスリリース③世界初！生きた皮膚で覆われたロボット」（2022/6/10）

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0114_00019.html

「プレスリリース④筋肉と機械が融合したバイオハイブリッドロボットを開発」（2018/5/31）

<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/2916/>

発表者・研究者等情報

東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻

竹内 昌治 教授

兼：東京大学生産技術研究所 特任教授（学内クロスアポイントメント）

東京大学国際高等研究所ニューロインテリジェンス国際研究機構 主任研究員

聶 銘昊（ニエ ミンハオ） 講師

森田 智博 特別研究員（日本学術振興会特別研究員 PD）

論文情報

雑誌名：Science Advances

題名：Tetanus-driven biohybrid robots powered by muscle rings with enhanced contractile force

著者名：Tomohiro Morita, Minghao Nie, and *Shoji Takeuchi

研究助成

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI20C1、科研費「基盤研究 S（課題番号：JP21H05013）」、JST「次世代研究者挑戦的研究プログラム（課題番号：JPMJSP2108）」、JST「挑戦的創造研究推進事業 ACT-X（課題番号：JPMJAX22KJ）」の支援により実施されました。

用語解説

（注1）骨格筋組織

骨格筋の筋芽細胞を3次元的に集積した状態で培養することで作られたもの。筋芽細胞が融合して形成される筋線維の集合体となっている。生体の骨格筋と同様の収縮運動や代謝を再現可能である。

（注2）バイオハイブリッドロボット

生体組織と人工素材を融合させたロボット。筋肉、皮膚、神経などの生体組織を利用することで、従来の機械ロボットにはない柔軟性や自己修復能力、センシング能力を持つ点が特徴。

（注3）リング状に成型された骨格筋組織（筋肉リング）

リング状に成型された骨格筋組織で、筋線維の集合体が周方向に配向している点が特徴的である。収縮させた際に、リングの空洞部を中心に寄せるように縮める動きを実現する。