

シカ後脚内の癒着と潤滑を模倣した深層生体模倣ロボット

西川 敢士（大阪大） 京谷 幸弥（大阪大） 松尾 勇吾（大阪大）
○増田 容一（大阪大） 原田 恭治（日獣大） 鈴森 康一（東工大）

This study developed a high-density musculoskeletal robot inspired by deer hind limbs to explore the impact of connective tissue lubrication on knee joint mobility. The robot's design mimics the femur's surrounding tissues using resin sheets, nonwoven fabric, and lubricants to replicate lubrication observed in deer. After silicone coating the robot, the research investigated how the presence or absence of these lubricated parts affects knee joint mobility.

1. はじめに

1.1 あいまいな動物身体の模倣と課題

動物の表層を切り開き、深層を目の当たりにすると、ロボットと生物との根本的な違いが見えてくる [1]。工業製品と比較したとき、動物体内の性質をひとことで表すと「あいまい」である。動物の体内を観察すると、組織と組織がベッタリと癒着しており、どこからどこまでが別の部品なのか見分けがつかない。そもそも物理的に溶け合い、混ざり合っているような部位では部品間の境界が存在せず、多様な組織が連続的な物理特性のグラデーションを作っている。現代のロボット工学では「明瞭さ（シンプルさ、高剛性、高精度、機能のモジュール化）」を重んじる世界観が共有されているのに対して、動物の体内には「あいまいさ（複雑さ、低剛性、低精度、干渉化設計）」で成り立つ真逆の世界観が広がっている。このような、従来の工学とは真逆の身体構成原理を科学の俎上に乗せることが、今後の生体模倣ロボティクスにおける課題の一つである。そのため、論文への記述可能性の問題や、複雑なロボットを実装したり実験する際の再現性や妥当性を確保する問題、提案手法やロボットの評価基準の問題を当該コミュニティ全体で乗り越えていく必要がある。

あいまいな動物身体の難しさは、従来の分析的な理解や、モジュール的な設計が通用しない点にある。工業製品においては一つの部品に一つの機能を集約するモジュール設計が好まれる。一方、あいまいな動物体内では多数の身体組織が複雑に相互干渉することで、無限定な環境に対応するための多彩な機能や適応性を生み出すことができる。このような複雑な相互干渉系は、シンプルな要素に分解して原理を見出す要素還元的な方法論では理解が難しい。これは同時に、身体を構成する要素をモジュール的に積み上げる従来の設計法が難しいことも意味する。このような系を理解したり設計論へと昇華するためには、従来の bio-inspired robotics [2] や構成論的アプローチ [3] に加えて、複雑な身体-環境系を現実的な議論に乗せて取り扱うための視座や科学的方法論が必要である。複雑な身体-環境系とその適応原理を理解する糸口となり得るのが、状況（自身の状態や、環境からの刺激や拘束）に応じた機能の切り替わりに着目する「身体多義性」の議論である [4]。ロボット周辺の状況や、環境と体内組織の連成を陽に扱う多義性の視点は、身体性に基づく自律的な機能創発や行動選択の原理を理解して、設計論に昇華するための指針になると期待している。



図1 シカ後脚を模倣した深層生体模倣ロボット

1.2 癒着と潤滑の模倣

これまで、動物の構造を模倣した筋骨格ロボットが開発されてきた [5, 6, 7, 8]。従来の筋骨格ロボットは、動物の筋肉にあたる人工筋やワイヤの先端を骨格に固定することでトラス状の筋骨ネットワークを実装している。一方で、動物は骨や、筋肉、結合組織などが高密度に配置された連続体であり、生体組織を相互に作用させながら効率的で滑らかな動作を生み出すことができる。今後、生体組織間の相互作用から創発される機能を理解しながら再現するためには、体内で連続体が複雑に連成するロボットのための技術体系が必要になる。そこで本研究では、高密度な生体模倣ロボットの体内を滑らかに動かすための潤滑と癒着の設計に取り組む。

これまで筋骨格ロボットの体内に潤滑を生み出す方法が考えられてきた。例えば、高潤滑性の素材を組み合わせる方法 [9] や、オイルなどの潤滑剤を注入 [10, 11] する方法がある。Kim ら [12] は、ゴム製の皮膚の内部に潤滑剤を注入することで、指型ロボットの皮下を潤滑させた。一方で、動物の身体は骨や、筋肉、結合組織が密に配置された一塊の連続体である [13]。動物の身体のように、密に詰まった連続体身体を滑らかに動かすためには、動物体内の癒着部位と潤滑部位を特定したうえで、癒着と潤滑という2つの極端な特性を身体内に作り分ける技術が必要になる。

本研究では、シカの後肢を参考に結合組織による癒着と潤滑を模倣した高密度筋骨格ロボット（図1）を製作し、膝関節の可動性への影響を調査する。本稿では特に、膝関節の可動性に関わる大腿骨まわりの組織に

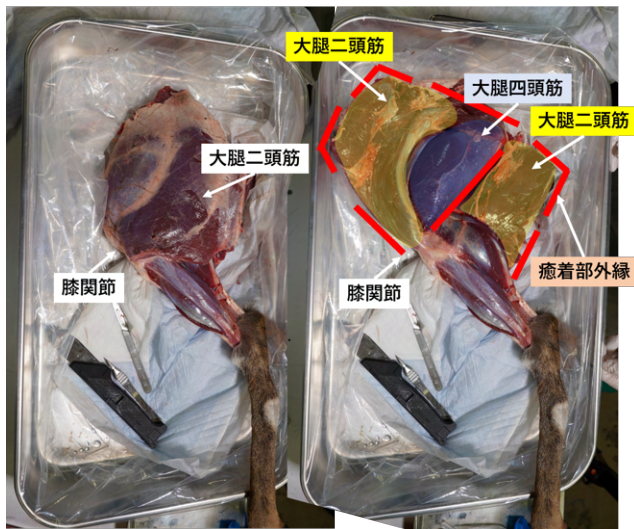


図2 シカ後肢の解剖。赤色がメスで鋭性剥離（切離）を行った箇所，黄色および青色で示した面が鈍性剥離を行った箇所。

おける潤滑を模倣する。はじめに，シカの骨格と，筋肉，筋膜を模倣した筋骨格構造 [14] を製作した。樹脂シートと，不織布，潤滑剤を併用した潤滑部の設計手法 [15] により，シカ後肢の解剖で確認された潤滑部の再現を行った。ロボットをシリコンコーティングしたのち，潤滑部の有無による膝関節の可動性への影響を調査した。

2. シカ後肢，大腿骨まわりの潤滑部位

本研究では，膝関節の可動性に関わる大腿骨まわりの組織における潤滑を模倣し，膝関節の可動性への影響を調査する。

大腿骨まわりの潤滑部を調査するために，シカ後肢の解剖を行った。解剖においてはオープンソースの解剖レシピ [16] を用いた。本稿では，手技による鈍性剥離（鋭利な刃物を用いない組織の剥離）を行い，剥離できた箇所を潤滑部と定めた。

解剖の様子を図2に示す。図はシカ後肢を外側から撮影したものであり，赤色がメスで鋭性剥離（切離）を行った箇所，黄色および青色で示した面が鈍性剥離を行った箇所である。鈍性剥離の結果，大腿骨まわりの筋肉のうち，大腿二頭筋の内側面および大腿四頭筋の側面を剥離できた。ただし，大腿二頭筋と大腿四頭筋の境界には結合組織が存在するため内部の空間は繋がっていなかったため，鋭性剥離によって切離した。また，大腿二頭筋の内側面の内部空間には，股関節側および，腓腹筋付近（図2，赤線の途絶部）からアクセスできることを確認した。

3. 筋骨格および潤滑部の設計

潤滑部を模倣したロボットを構築するにあたって，まず内部の筋骨格構造を製作した。シカ後肢の筋骨格構造に基づいて設計した骨格を3Dプリンタで造形したのち，筋膜による潤滑を模倣するための人工筋-筋膜複合ユニット [14] を配置した。本ユニットは，マッキベン型人工筋の表面を低摩擦のナイロンポリエチレン袋で

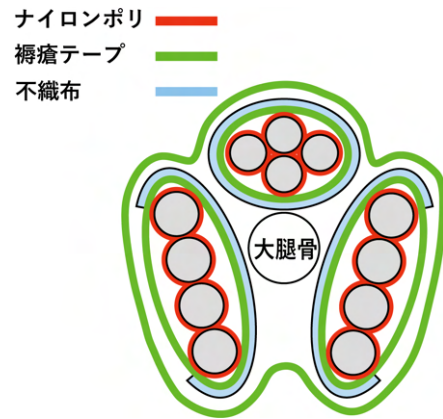


図3 シカロボット体内における各材料の配置。図は大腿の横断面であり，灰色が人工筋，赤色がナイロンポリ袋，緑が褥瘡テープ，青が不織布を表す。

覆った構造になっている。ナイロンポリエチレン袋を熱溶着して多数のチューブ状に加工することで筋間に隔壁を作り筋間の摩擦を防いだ。筋骨格の詳細は [14] を参照されたい。

人工筋および骨の表面における潤滑部の設計では，褥瘡テープおよび不織布を用いた。図3に大腿の横断面における各材料の配置を示す。灰色が人工筋，赤色がナイロンポリ袋，緑が褥瘡テープ，青が不織布を表す。まず，褥瘡テープはドレッシング材とも呼ばれ，創傷の保護に用いられる薄いポリウレタンシートである。片面に粘着剤が塗布してあるほか柔軟性に優れる特性をもつ。本研究では褥瘡テープを，人工筋束や，関節，ロボット表層の被覆に用いて各部の薄膜状の結合組織を模倣した。

つぎに，不織布は図2で観察された潤滑部を配置するために用いた。シリコンコーティングを行った際に，潤滑材を塗布した箇所のみを局所的な潤滑部として設計できることが利点である。不織布をズレなく配置するために，不織布の端部と褥瘡テープ，および不織布の端部とナイロンポリ袋をウレタン系接着剤で接着した。配置した不織布のうち潤滑させたい面に潤滑剤（ポリアクリル酸ナトリウム溶液）を浸透させた。また，シリコンは蒸気を透過するため，時間経過によって少しずつ潤滑剤が乾燥してしまう。そこで，メッシュ状に穴を空けたシリコンチューブを大腿二頭筋の間（股関節から膝関節裏にかけて）に配置することで，乾燥した潤滑剤に再加水するための流路を構築した。これにより，結合組織内の水分や潤滑剤を循環させる，動物のリンパ系にあたる働きが期待できる。潤滑部の造形法の詳細は [15] を参照されたい。

4. シリコンコーティング

本研究では，動物の連続体身体を再現するためにロボット脚をシリコンでコーティングした。筋骨格構造の製作からコーティングまでの工程を図4に示す。コーティングは同じ機体に対して計2回行った。1回目のコーティングでは粘着性の高いEcoflexGELを用い，2回目には表面の保護のためにEcoflex30-00を用いた。

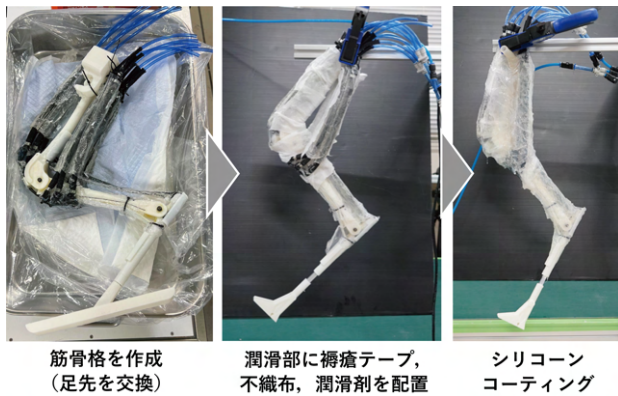


図4 筋骨格構造の製作からコーティングまでの工程

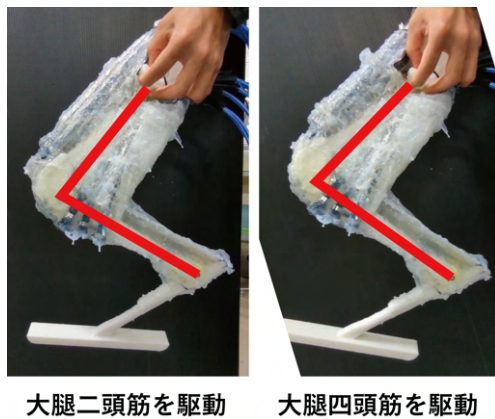


図5 潤滑部を設計しない場合の膝関節の可動性.

5. 膝関節における可動性の確認

最後に、潤滑部の有無に対する膝関節の可動性を確認した。実験では、大腿二頭筋（膝屈筋）および大腿四頭筋（膝伸筋）に対して、交互に $0.6[\text{MPa}]$ の空気圧を印加した。

比較対象として、図5に大腿骨周辺の潤滑部を配置しなかった際の膝関節の可動性を示す。ただし人工筋を被覆するナイロンポリ袋は実装されていることに注意する。実験の結果、屈筋と伸筋を交互に駆動したにも関わらず、膝関節がほとんど動いていないことが確認された。シリコンが大腿二頭筋の間に浸透したのち固着したことで、膝関節の可動性が著しく損なわれている。

図6に、大腿骨周辺に潤滑部を配置した際の膝関節の可動性を示す。図6上図はシリコンコーティング前、下図はコーティング後のロボット脚部である。ただし、内部の筋骨格は図5のロボットを解剖して再利用した。図より、屈筋と伸筋を交互に駆動すると、膝関節の大きな屈伸運動が確認できる。さらに、コーティングの前後を比較しても膝関節の可動性がほとんど損なわれていないことが確認できた。

6. おわりに

本研究では、シカの後肢を参考に結合組織による癒着と潤滑を模倣した高密度筋骨格ロボットを製作し、膝関節の可動性への影響を調査した。ロボット体内に局所的な「癒着と剥離」を設計することで関節の可動性

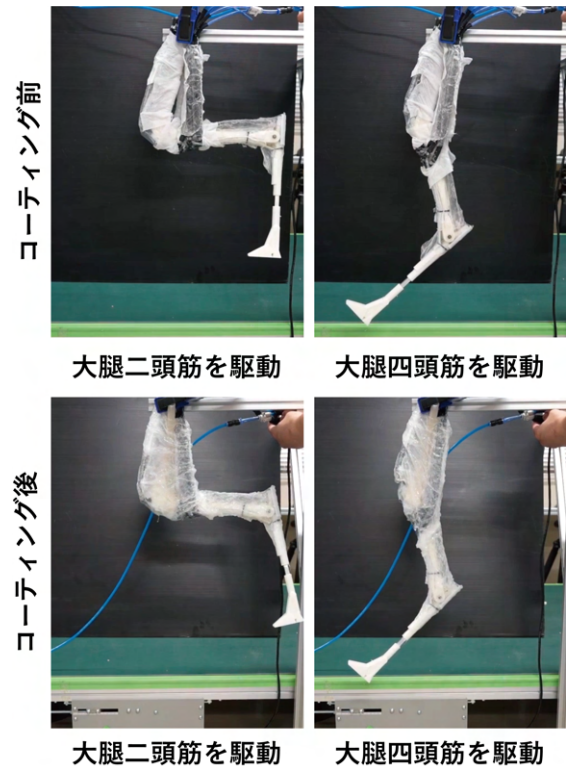


図6 潤滑部を設計した場合の膝関節の可動性。上図はシリコンコーティング前、下図はコーティング後の可動性。屈筋と伸筋を交互に駆動すると、膝関節の大きな屈伸運動が確認できる。コーティングの前後を比較しても膝関節の可動性がほとんど損なわれていないことが確認できる。

を損なわないロボット設計の可能性が示された。多様な組織が高密度に配置されたひと固まりの連続体を滑らかに駆動するための新たな技術体系の確立を目指すほか、多様な連続体間の相互作用から生じる運動機能を調査する。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JP-MJFR202F, JSPS 科研費基盤 (S) 23H05445, JSPS 科研費基盤 (B) 21H01276, 22H01429 を受けて行われた。本研究を遂行するにあたって石川将人先生、難波江裕之先生、郡司芽久先生、福原洗先生から有益な議論をいただいた。また、野生鳥獣研究所けものら (kemono Lab) の金山俊作氏に解剖用の献体を提供いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] C. Stecco, Functional atlas of the human fascial system. Elsevier Health Sciences, 2014.
- [2] N. Gravish and G. V. Lauder, Robotics-inspired biology, J Exp Biol, vol. 221, no. Pt 7, Mar 29 2018.
- [3] Y. Kuniyoshi, Y. Yorozu, S. Suzuki, S. Sangawa, Y. Ohmura, K. Terada, and A. Nagakubo, Emergence and development of embodied cognition: A constructivist approach using robots. Progress in brain research, 164, 425-445, 2007.
- [4] A. Fukuhara, M. Gunji, and Y. Masuda, Comparative anatomy of quadruped robots and animals: a review. Advanced Robotics, 1-19, 2022.

- [5] K.Ogawa, K. Narioka, and K.Hosoda, Development of whole-body humanoid “Pneumat-BS” with pneumatic musculoskeletal system. In 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4838-4843, IEEE, 2011.
- [6] Y. Asano, S. Ookubo, M. Kawamura, S. Nakashima, T. Katayama, I. Yanokura, T. Hirose, K. Kawaharazuka, S. Makino, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba, Human mimetic musculoskeletal humanoid Kengoro toward real world physically interactive actions. In 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 876-883, IEEE, 2016.
- [7] S. Kurumaya, K. Suzumori, H. Nabae, and S. Wakimoto, Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles. *Robomech Journal*, 3, 1-15, 2016.
- [8] K. Miyashita, Y. Masuda, M. Gunji, A.Fukuhara, K. Tadakuma, and M. Ishikawa, “Emergence of Swing-to-Stance Transition from Interlocking Mechanism in Horse Hindlimb” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020.
- [9] Z. Xu, E. Todorov, B. Dellon, and Y. Matsuoka, Design and analysis of an artificial finger joint for anthropomorphic robotic hands. In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5096-5102, IEEE, 2011.
- [10] 増田, 郡司, 福原, 柔軟素材の癒着と剥離を活用したソフトロボットの造形法, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2P2-K11, 2022.
- [11] 三木, 佐原, 深山, 李林, 長谷川, 河原塚, 岡田, 稲葉, 人の関節潤滑機能を模した人体模倣ロボットの液体滲出軟骨機構の構成法, in 第24回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, 2E3-07, 2023.
- [12] Y. Kim, J. J. Yoon, and Y. W. Sim, Fluid lubricated dexterous finger mechanism for human-like impact absorbing capability. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 3971-3978, 2019.
- [13] F. H. Netter, *Atlas of human anatomy*, Elsevier health sciences, 2014.
- [14] 松尾, 増田, 鈴森, 結合組織の滑りと癒着を模倣した高密度筋骨格ロボット, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1-R09, 2024.
- [15] 増田, 柔軟素材の癒着と剥離を活用したソフトロボットの造形法 第二報: 繊維膜を活用した癒着と剥離の設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-R03, 2024.
- [16] 増田, 郡司, 福原, 工学者のための解剖レシピ: ロボット実験室でできる省スペースの解剖法, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-F13, 2023.