

解剖学的ロボットモデルによるウマ体内の動力学機序の探究



技術解説

増田 容一*

Exploration of Dynamic Mechanisms within the Horse Body
Using an Anatomical Robotic Model

Key Words : Musculoskeletal Robot, Anatomy, Animals

はじめに

ロボットの歴史は、からくり人形やオートマタなど、動物の形態や動きを模倣することから始まった。神経回路に着想を得たニューラルネットワークの発展とともに、動物の脚歩行に着想を得た四脚や二脚のロボットが実世界へと進出しつつある。

一方で、現代のロボットには動物とは全く異なる要素技術も用いられている。例えば、回転関節や、モータ、ギア、電池、電子回路や、センサ、コンピュータの多くは自然界からの模倣ではなく工学独自の発想から生じている。それゆえ動物模倣の研究者は、工学人から頻繁に「動物は必ずしも最適ではないのではないか?なぜ動物を手本にする必要があるのか」という質疑を受けてきた。事実として、多くの生物は工学的な評価基準において最適ではない。平地を高速走行するのであれば脚より車輪が適するし、長距離を高速に飛翔するには羽ばたき機ではなく固定翼機が勝ることはよく知られた事実である。

それでも筆者が動物模倣に魅力を感じるのは、動物が実世界で生じる多様な状況において好適である(好い加減に適する¹⁾)からである。動物はその生涯に出会う様々な苦難や、時には生涯で初めて対峙する状況を乗り越える必要がある。また環境が大きく変化した際に、身体部位を異なる目的へと転用(前適応)できることが知られている。動物の体内には、

一見して無駄にも思える多種多様なメカニズム²⁾が備わっており、これらを適切に使い分けることで、複雑性や、多様性、そして予測不可能性にあふれた実環境でしぶとく生き延びることができる。

上記のような好適さや、多様性から生じる適応能の多くは、工学的な目的や評価関数を定めた時点で失われてしまう。単一の評価関数に基づき工学的に最適化された一芸特化の機械ではなく、様々な状況で好適に振る舞う多芸多才なキカイの設計論を、工学の議論のフォーマットに乗せることが今後の課題であると考えられる。

解剖により体感されるロボットと動物の違い

動物を解剖してみると、動物と現代ロボットとを隔てる構成原理の大きな違いに気付かされる。

現代のロボット工学の特徴は「明瞭さ」であると筆者は考える。工学では、システムの設計や、生産、制御、保守は単純明快であるべきだというシンプルイズベストの思想のもとで、高剛性化や、高精度化、機能のモジュール化が推進されてきた。

これに対して動物を解剖してみると、現代ロボットと生物との差異を改めて実感できる。工業製品と比較したとき、動物に特有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グラデーションを作っている。また、工業製品においては分解・組み立てを前提としたモジュール設計が好まれるが、あいまいな動物体内では多数の要素が相互に作用することで一つの機能を実現している。そのため、動物の仕組みを要素に還元して理解しようとしてもたちまちに機能が失われてしまう。



* Yoichi MASUDA

1990年6月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 機械工学
専攻博士後期課程 (2019年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科 機
械工学専攻 助教 博士(工学)
TEL : 080-5319-7191
E-mail : masuda@mech.eng.osaka-u.ac.jp

以上のように、現代のロボット工学では「明瞭さ（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おり、動物の体内には「あいまいさ（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「あいまい」な対象には、我々が長年研鑽してきた分析的な科学や設計の方法が通用しない。そのため筆者は、動物の体内には、今なお広大な工学のフロンティアが広がっていると考えている。この構成原理を理解して人類のものにすることができれば、有機的な世界観に基づく新しいモノづくりが可能になるかもしれない。そうなれば、動物のように生々しく動きまわる新しいキカイが世の中に溢れ、これまでとは一風変わった社会の風景が見られるはずだ。

解剖学的ロボットモデル

筆者とその研究グループでは、ウマがもつ走行能力の謎に迫るため、国立科学博物館の協力のもとでシマウマの解剖を行った。ここで筆者らはふと、シマウマの脚の根本（股関節）を持ち上げて、ブンと振って地面を蹴らせてみた。すると空中ではまるで生前のウマが駆けるような足先の軌道が生まれ、ひとたび脚が接地すると関節がロックされて体重を支持する力が生じた。

当然ながら、このシマウマは亡くなっており筋肉が動くことはありえない。いったい何が起きているのか？この現象を理解するヒントはウマの内部構造にある。ウマの脚には関節をまたいで多数のワイヤ（腱：tendon）が張り巡らされており、ひとつの関節を伸ばすと全ての関節が連動して伸びる。この「関節の連動性」によって、脚を空中で振るだけで多数の関節が協調して次の一步が生まれる。さらに脚が着地すると、床反力により足先の関節が伸ばされた結果、脚全体が伸展して体重が支持される（図1左）。つまりウマは脚内の受動的な連動機構のみにより、筋力をほとんど使わずに、走行に必要な足先軌道と体重支持力を生み出せることが示唆された。

さらに筆者らは、ウマの解剖から得られた「関節の連動性」のデータに基づいて、ウマ後脚の関節10点と腱12本を精巧に再現するロボットモデルを試作した（図1右）。ここで興味深い点は、両脚に搭載した動力が、股関節を駆動するモータ2つのみであり、残る8つの関節にはなんの動力も制御も存

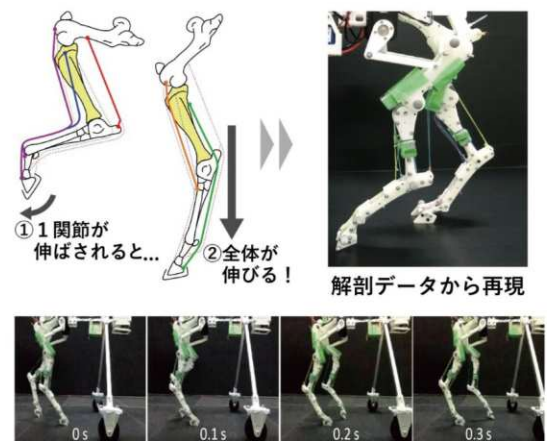


図1 ウマ脚内のワイヤ機構。多数のワイヤにより関節が連動することで、接地すると体重が自動的に支持される。

在しない点にある。にもかかわらず、股関節を周期的に振るだけで、複数の関節がしだいに協調をはじめ、ウマに酷似した足先軌道と体重支持力を生成しながら歩き出す現象が確認された³⁾。このような動きを伴う力学現象は、静的な構造を扱う解剖学では発見が難しい。この成果は、地面と脚の受動的ダイナミクスのみによって歩行運動が発現することがロボットモデルを用いて発見された好例だといえる。

上記は、ウマの脚部に備わる多数のワイヤのおかげで、接地した瞬間に体重支持の機能が発現する例であった。このように自然界の動物は、自らが置かれた状況に応じて、身体部位の機能を多彩に切り替えるメカニズムを持っている。例えば、動物は手足をロコモータ（locomotor：運動器、移動器）として活用する一方で、状況に応じてマニピュレータ（manipulator：操作器）として利用する。ところが、ロコモーション時の手足には地面と身体を繋ぐための拘束力が、マニピュレーション時の手足には十分な自由度が求められるため、ここに機能のトレードオフが生じる。この問題に対して、ウマやクマでは、手足が地面に接地して床反力を受けると、動物体内の骨形状や、ワイヤによる関節間の連動メカニズムによって関節自由度の一部が拘束される。筆者らは、このような身体部位の機能を転換する刺激応答性を、状況に応じて意味を変化させる多義語や多義図形とのアナロジーに基づいて、「身体多義性」や「多義的メカニズム」と呼んでいる²⁾。多義的メカニズムは、動物が無限定な自然界で生き残るために、生まれ持った有限の身体資源や計算資源を駆使するための方

策であると考えられる。

工学者のための解剖レシピ

ロボットの構造を生物に近づけて、その構成原理を理解するためには、われわれ工学者自身が動物の姿を目で見て、触れることで得られるような、実感を伴う理解が重要になる。

ロボット工学で扱う現象は主に身体力学や制御などの「動き」に関するものであるから、教科書や書籍で静的な構造を調べるだけでは不足が多い。動力学にかかわる重さ・硬さ・粘り・力学的拘束や可動範囲・壊れかたを、体感もしくは実測によって把握するためには、工学者自身の手で動物解剖を行うことが好ましい。自分の手で、動物の身体を押してみる・動かしてみる・振ってみることで感じられる手応えや動きなどの応答は、動物の体内機構を理解する際に重要な手がかりになる。

そこで筆者とその研究グループでは、動物に興味のある工学者のために、工学系の実験室であっても解剖を実施できるレシピを公開している（工学者のための解剖レシピ⁴⁾⁵⁾、図2）。本レシピにより、特殊な解剖施設をもたない工学者であっても、ロボット実験室などに2平方メートル程度のスペースを確保すれば、臭いを抑えながら解剖を行うことができる。

解剖の対象として、衛生的に管理され、倫理的な問題も少ない食肉を用いる。トリやウサギ、ワニ、カエルなどのほか、シカ、イノシシ、クマなどのジビエはネット通販で購入することができる。

解剖をいざ実施するとき、安全衛生への対策が大きな課題になる。特に感染症や悪臭の原因となる解剖体の腐敗の対策が問題になる。一般的な解剖は、水洗いが可能な施設で、部屋全体を冷却しながら行われることが多いが、工学者にはハードルが高い。そこで本レシピでは、できるだけ簡素かつ省スペースでも解剖を行える解剖設備の構成を模索した。

本手法の特徴は、省スペース性と腐敗の防止策にある。解剖体を保管するために60×120cmのスペースに設置可能な小型の冷凍庫を選定し、冷凍庫の上に、クールプレート、ステンレスバット、解剖体を配置する構成とした。クールプレートとは、食品用に販売されている冷却装置のついたテーブルであり、内部に大型のペルチェ素子を備えている。一般



図2 公開している解剖レシピ。ロボット実験室の省スペースに設置できるコンパクトな構成。

的な解剖は部屋全体の温度を下げて行われるが、クールプレートで肉を冷やし続けることで、一般的な室温下でも解剖体の鮮度を保ち腐敗を防ぐことができる。

上記の取り組みは、工学と生物学の両方の素養を備えた融合人材を育成するためのよいツールになると考えている。これにより、単に生物学の知見を工学へと一方的に輸入するだけでなく、「作りながら理解を深める」という工学者ならではの視点を生物学に取り入れることで、生物学にとっても新たな視点を提供できるかもしれない。

動物の体内メカニズムを体感しよう

日本科学未来館における筆者らのウマ後肢ロボットの動態展示では、動物の不思議を目で見て、触れて、体感できる常設展示を2025年6月まで開催中である。動物の体内にはまだまだ未解明の謎が眠っている。この面白さが少しでも伝われば幸いです。

参考文献

- 1) 鈴森康一."ロボットから生き物へ."日本ロボット学会誌 42.5 (2024): 419-422.
- 2) A. Fukuhara, M. Gunji, and Y. Masuda. "Comparative anatomy of quadruped robots and animals: a review." *Advanced Robotics* 36.13, pp. 612-630, 2022.

- 3) K. Miyashita, Y. Masuda, M. Gunji, A. Fukuhara, et al. "Emergence of swing-to-stance transition from interlocking mechanism in horse hindlimb." IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 7860-7865, 2020.
- 4) 増田容一, 郡司芽久, and 福原洸. "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講演概要集 2023. 一般社団法人日本機械学会, 2023.
- 5) 多義的メカニクス研究会, 工学者のための解剖レシピ,
<https://polysemanticrobotics.wixsite.com/tagimech/how-to-do-dissection>



タンチョウ