

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 犬の筋骨格ロボットの歩行実験                                                            |
| Title(English)    | A Gait Experiment of Canine Musculoskeletal Robot                         |
| 著者(和文)            | 伊藤春那, 難波江裕之, 原田恭治, 福原洸, 鈴森康一                                              |
| Authors(English)  | Hana Ito, Hiroyuki Nabae, Yasuji Harada, Akira Fukuhara, Koichi Suzumori  |
| 出典(和文)            | ロボティクス・メカトロニクス講演会2024講演論文集, , ,                                           |
| Citation(English) | Proceedings of the 2024 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , |
| 発行日 / Pub. date   | 2024, 5                                                                   |

# 犬の筋骨格ロボットの歩行実験

## A Gait Experiment of Canine Musculoskeletal Robot

○学 伊藤春那 (東工大) 正 難波江裕之 (東工大)  
原田恭治 (日獣大) 正 福原洸 (東北大)  
正 鈴森康一 (東工大)

Hana ITO, Tokyo Institute of Technology, ito.h.ay@m.titech.ac.jp

Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology, nabae.h.aa@m.titech.ac.jp

Yasuji HARADA, Nippon Veterinary and Life Science University, yasuji@nvlu.ac.jp

Akira FUKUHARA, Tohoku University, a.fukuhara@riec.tohoku.ac.jp

Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology, suzumori.k.aa@m.titech.ac.jp

Biomimetics has the aspect of understanding the mechanisms and movements of living organisms. In this study, we paid particular attention to the canine forelimb structure. Since the clavicle is degenerated in dogs, the forelimbs are connected to the trunk via only soft organizations like muscles. This is a flexible connection, different from that of the hindlimbs. We aim to clarify the role of those structures in efficient walking and running. For this purpose, we fabricated a dog leg musculoskeletal robot using thin McKibben artificial muscles. In this paper, we describe the quadrupedal experiment using this robot. We confirmed that the robot moved forward by driving the limbs based on the actual pattern of the walk gait.

**Key Words:** Musculoskeletal robot, Biomimetics, Soft robot, Thin McKibben muscle, Quadrupedal locomotion

### 1 緒言

生体模倣を行うことにより、生物がもつ様々な機能の発現が期待される。ロボット分野では、生物の機能を応用して高性能なロボットを実現することを目的として、高速走行を目指したチーターの筋骨格模倣 [1] や、ダチョウの首を模倣した柔軟なマニピュレータ [2] などの研究が行われてきた。一方で、生体模倣には、生物がもつ機構や運動特性を明らかにするという側面もある。これまでに、絶滅した生物の運動推定 [3] や、四脚筋骨格ロボットによる自律的な運動生成メカニズムの解明 [4] などの研究例がある。本研究では、犬の脚を対象に、運動における機能を理解することを目的とする。

従来のロボット技術では生物の柔軟な構造を模倣することが難しいため、様々なソフトアクチュエータが開発されてきた [5][6]。中でも細径 McKibben 型人工筋 [7] は、軽量で柔らかく、曲がった状態でも収縮することができるという特性をもち、生体模倣に適している。その特徴を活かし、人体 [8]、キリン [9]、犬後肢 [10] を対象に、生物らしいしなやかな運動を実現する研究が行われてきた。本研究でも細径 McKibben 型人工筋を使用し、特に犬の前肢の筋骨格構造に着目して模倣を行う。

犬は鎖骨が退化しているため、前肢の根元である肩甲骨と体幹部の骨との間に関節がなく、筋肉等の柔軟組織のみで接続されている。これはハンモック構造と呼ばれる柔軟な接続様式であり [11][12]、股関節で骨格が接して繋がっている後肢とは大きく異なる点である。この構造は運動において重要な役割をもつことが示されている [13][14] が、この前肢の柔軟な構造を再現したロボットはほとんどない。筆者が知る限り、ハンモック構造に着目し、猫をモデルとしたロボットの肩部の筋肉をゴム膜で模した研究 [15] がある程度である。しかし、このロボットの肩部の筋肉が受動要素であるのに対し、実際の生物の筋肉では能動的な働きが主要な機能である。

そこで本研究では、主に前肢の構造に着目して犬の脚の筋骨格構造を模倣し、筋肉の能動的な収縮を実現することにより、効率的な歩行や走行を実現するための機能を明らかにすることを目指している。これまでに、細径 McKibben 型人工筋を用いて犬の左前肢の筋骨格ロボットを製作した [16]。本稿では、四肢の模倣を行い、筋骨格ロボットによる歩行実験について述べる。

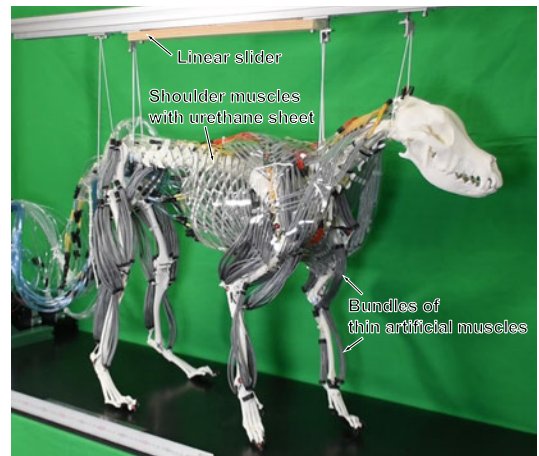


Fig.1 Dog musculoskeletal robot.

### 2 前肢および後肢の脚軌道の再現

製作した筋骨格ロボットを図 1 に示す。右前肢、および右後肢を対象に、ウォークにおける脚軌道の再現を行なった。歩行時の着地してから次に着地するまでを 1 サイクルとして、10 フェーズに分割する、(i)~(vi) を立脚期、(vii)~(x) を遊脚期とする。(i) が着地直後、(vii) が地面の蹴り出し直後に相当する。各フェーズで駆動させる筋肉は図 2、図 3 の通りであり、先行研究 [13][17][18] に基づいて決定した。各筋肉について on/off の切り替えのみを行い、印加する空圧は 0.4 MPa で一定とした。ただし、広背筋のみ絞り弁を使用して空気の流入速度を抑えた。広背筋は模倣した中で最も大きい筋肉であり、収縮量が大きく、前肢を尾側へ引く作用が強く出すぎてしまうためである。ここで、肩部の筋肉にはゴムシートとしてウレタンシート (硬度: アスカー C80, アズワン) を使用した。厚さは入手可能なもののなかで最も薄い 0.5 mm を選択した。

動作させたところ、前肢、後肢ともに立脚期と遊脚期を明確に

|                             | Stance phase |    |     |    |   |    | Swing phase |      |    |   |
|-----------------------------|--------------|----|-----|----|---|----|-------------|------|----|---|
|                             | i            | ii | iii | iv | v | vi | vii         | viii | ix | x |
| Serratus ventralis thoracis |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Rhomboid                    |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Superficial pectoral        |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Deltoid                     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Latissimus dorsi            |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Trapezius cervical part     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Trapezius thoracic part     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Cleidocervical              |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Deep pectoral               |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Omotransverse               |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Extensor carpi radialis     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Supraspinatus               |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Triceps brachii             |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Triceps brachii-long head   |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Teres major                 |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Biceps brachii              |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Deep digital flexor         |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |

Fig.2 Muscle activation pattern input to forelimb.

|                    | Stance phase |    |     |    |   |    | Swing phase |      |    |   |
|--------------------|--------------|----|-----|----|---|----|-------------|------|----|---|
|                    | i            | ii | iii | iv | v | vi | vii         | viii | ix | x |
| Psoas major        |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Middle gluteal     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Quadriceps femoris |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Biceps femoris     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Semitendinosus     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Cranial tibial     |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |
| Gastrocnemius      |              |    |     |    |   |    |             |      |    |   |

Fig.3 Muscle activation pattern input to hindlimb.

分けることができた。また、立脚から遊脚へ切り替わる際の蹴り出し動作が再現され、前進するための推進力を得られることが示された。

### 3 四足歩行の再現

前節で片前肢、片後肢にて脚軌道の再現を行なった。本節では、図 2、図 3 に示した筋活動パターンを組み合わせたことにより四足歩行を再現した。歩容はウォークを対象とした。前節と同様に歩行の 1 サイクルを 10 フェーズに分割し、(I)-(X)とした。左前肢の 1 サイクルを基準として、左前肢の着地直後を (I)、リフトオフ直前を (VI) とした。各フェーズにおける四肢の立脚、遊脚の状態は図 4 の通りである。上部にスライダを設置しており、x 軸方向に自由に移動することができる。また、空圧用チューブの重量の影響を軽減するため、チューブをスライダから吊り下げた。摩擦係数を高めるために地面にゴムシートを敷き、足裏にもゴムシートを貼り付けた。

動作中の各フェーズにおける四肢の状態は図 5 の通りとなり、x 軸方向の前進を実現した。図 5 に示した 1 サイクルの変位量は 55 mm であった。連続して駆動させると、数歩前進してスライダの右端まで移動し、総変位量は 180mm となった。左右後肢および右前肢の 3 脚では前節で一歩で行なった場合と同様の脚軌道を再現でき、地面の蹴り出しを実現した。一方で課題として、左前肢は脚軌道は再現できていたものの、立脚期に相当するフェーズで接地できず常に遊脚状態となっていたため、地面を蹴る動作

|                | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|----------------|---|----|-----|----|---|----|-----|------|----|---|
| left hindlimb  |   |    |     |    |   |    |     |      |    |   |
| left forelimb  |   |    |     |    |   |    |     |      |    |   |
| right forelimb |   |    |     |    |   |    |     |      |    |   |
| right hindlimb |   |    |     |    |   |    |     |      |    |   |

Fig.4 Footfall pattern in walk. Blue indicates the stance phase, and others indicate the swing phase.

が再現されなかった。主な原因は、左前肢の人工筋が複数損傷しているためであると考えられる。使用した骨格標本が左右対称ではないこと、模倣した筋肉の製作や付着の際に左右差が生じてしまったこと、空圧用チューブおよび継手の重量により左右のバランスが悪くなっていたことも原因として挙げられる。また、全体として自重に対して空圧用チューブが重いことで前進を妨げることがあったため、四足歩行を実現するためには、空気圧の供給に関しても改善する必要がある。

## 4 結言

本研究では、運動における犬の筋骨格構造の役割を理解することを目的として、細径 McKibben 型人工筋を用いて犬の四肢の筋骨格ロボットを製作した。また、このロボットを使用して四足歩行実験を行なった。前肢および後肢の脚軌道と地面の蹴り出しを再現し、実際の歩行パターンに基づいて四肢を駆動させることで、前進が可能であることを確認した。今後は、様々な歩容を対象に四足歩行を実現し、歩行において犬の脚の筋骨格構造がもつ役割を明らかにする。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 23H05445 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Wang, X., Li, M., Guo, W., Wang, P. and Sun, L., Design and development of a cheetah robot under the neural mechanism controlling the leg's muscles, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2012), pp.2749–4479.
- [2] Nakano, K., Gunji, M., Ikeda, M., Or, K., Ando, M., Inoue, K., Mochiyama, H., Nakajima, K., Niiyama, R., and Kuniyoshi, Y., “RobOstrich” Manipulator: A Novel Mechanical Design and Control Based on the Anatomy and Behavior of an Ostrich Neck, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.8, No.5 (2023), pp.3062–3069
- [3] Peterman, D.J., Ritterbush, K.A. Resurrecting extinct cephalopods with biomimetic robots to explore hydrodynamic stability, maneuverability, and physical constraints on life habits, Scientific Report, Vol.12, No.1 (2022), p.11287.
- [4] Yamada, Y., Nishikawa, S., Shida, K., Niiyama, R., and Kuniyoshi, Y., Neural-body coupling for emergent locomotion: A musculoskeletal quadruped robot with spinobulbar model, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2011), pp.1499–1506.
- [5] Suzumori, K., Iikura, S. and Tanaka, H., Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms, IEEE Control Systems Magazine, Vol.12, No.1 (1992), pp.21–27.
- [6] Kim, J., Kim, J., Kim, H., Zhai, L., Ko, H., and Muthoka, M. R., Review of Soft Actuator Materials, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.20 (2019), pp.2221–2241.
- [7] Wakimoto, S., Suzumori, K. and Takeda, J., Flexible artificial muscle by bundle of McKibben fiber actuators, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) (2011), pp.457–462.
- [8] Kurumaya, S., Suzumori, K., Nabae, H. and Wakimoto, S., Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, Robomech Journal, Vol.3 (2016), pp.1–15.
- [9] Niikura, A., Nabae, H., Endo, G., Gunji, M., Mori, K., Niiyama, R. and Suzumori, K., Giraffe Neck Robot: First Step Toward a Powerful and Flexible Robot Prototyping Based on Giraffe Anatomy, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.7, No.2 (2022), pp.3539–3546.
- [10] 羅基燦, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴森康一, 人工筋を用いた犬の後肢の筋骨格系模倣, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2022), 2A1-F12.
- [11] Fukuhara, A., Masuda, Y., Gunji, M., Tadakuma, K., and Ishiguro, A., Development of Quadruped Robot That Can Exploit Shoulder Hammock Structure, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (2020a), pp.1139–1143.

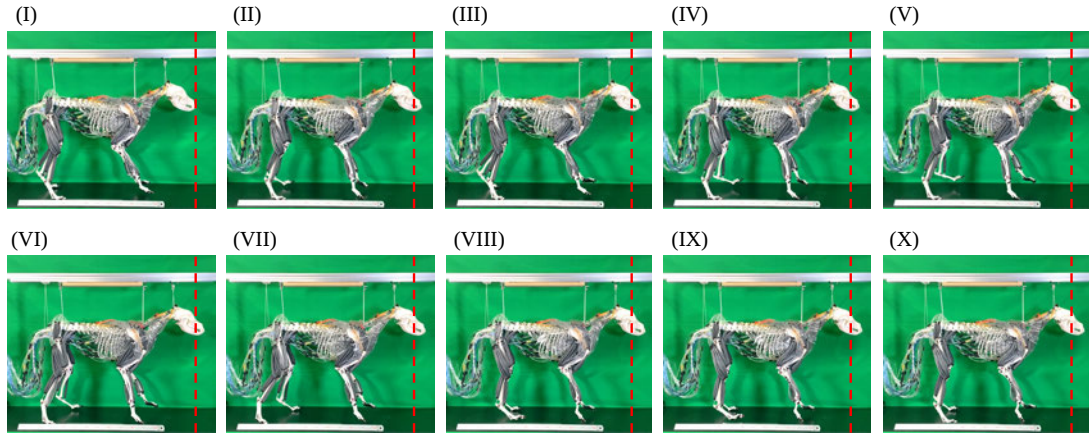


Fig.5 State of each phase. (I)-(X) corresponds to Fig.4. The red dotted line indicates the position of the head in Phase (I). The body is moving forward relative to the line.

- [12] Fukuhara, A., Gunji, M., Masuda, Y., Tadakuma, K. and Ishiguro, A., A Bio-inspired Quadruped Robot Exploiting Flexible Shoulder for Stable and Efficient Walking, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2020b), pp.7832–7839.
- [13] Deban, S. M., Schilling, N. and Carrier, D. R., Activity of extrinsic limb muscles in dogs at walk, trot and gallop, Journal of Experimental Biology, Vol.215 (2012), pp.287–300.
- [14] Carrier, D. R., Deban, S. M. and Fischbein, T., Locomotor function of forelimb protractor and retractor muscles of dogs:evidence of strut-like behavior at the shoulder, Journal of Experimental Biology, Vol.211, No.1(2008), pp.150–162.
- [15] 福原洸, 郡司芽久, 増田容一, 多田隈建二郎, 石黒章夫, 四脚動物の柔軟な肩部の運動機能の理解に向けた膜様筋骨格ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2022), 2A1-G10.
- [16] 伊藤春那, 難波江博之, 原田恭治, 福原洸, 鈴森康一, 細径人工筋を用いた犬前肢の筋骨格模倣, 第 41 回日本ロボット学会学術講演会概要集, 2023.
- [17] Stark, H., Fischer, M. S., Hunt, A., Young, F., Quinn, R. and Andrada, E., A three-dimensional musculoskeletal model of the dog, Scientific reports, Vol.11, No.1 (2021), p.11335.
- [18] Fischer, M. S. and Lilje, K. E., Dogs in Motion, 2014, pp.88–129.