

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	犬の四肢の筋骨格ロボットの歩行動作実験
Title(English)	
著者(和文)	伊藤春那, 田中翔真, Na Gihyeok, 難波江裕之, FengYunhao, 原田恭治, 福原洸, 鈴森康一
Authors(English)	Hana Ito, Shoma Tanaka, Gihyeok Na, Hiroyuki Nabae, Yunhao Feng, Yasuji Harada, Akira Fukuhara, Koichi Suzumori
出典(和文)	第42回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# 犬の四肢の筋骨格ロボットの歩行動作実験

○伊藤 春那（東工大） 田中 翔真（東工大） 羅 基嫻（東工大） 難波江 裕之（東工大）  
ヒョウ ウンコウ（東工大） 原田 恭治（日獣大） 福原 洸（東北大） 鈴森 康一（東工大）

犬の筋骨格構造の運動における役割を理解することを目的に、筋骨格模倣ロボットを製作した。細径マッキベン型人工筋を用いて、犬などの四足歩行動物に特徴的な肩のハンモック構造を含む四肢の筋肉を模倣した。本研究では、製作した筋骨格ロボットを用いて、ウォークに加えてトロット、ペースを対象として歩行動作の模倣を行った。実際の犬の筋活動に基づいて駆動させることで、いずれの歩容でも前進が可能であることが確認された。

## 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、それらを用いて高性能なロボットを実現することを目的とした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目的もある。本研究では、後者の側面に着目し、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している。

生物の柔軟な構造を模倣するために、様々なソフトウェアが開発されてきた [1][2]。中でも細径 McKibben 型人工筋 [3] 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 [4]、キリン [5]、犬後肢 [6] 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、犬の四肢の筋骨格模倣を行う。

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 [7][8]、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 [9][10] 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。筆者らが知る限り、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 [11] がある程度である。このロボットでは、柔軟な肩を持つ四足歩行動物に見られる立脚時と遊脚時の肩甲骨の上下運動が再現されており、前肢の運動において肩部の筋肉群による張力の相互関係が重要な役割を果たすと報告されている。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て、実際の生物の筋肉では受動的な伸展よりも能動的な収縮が主要な機能である。したがって、生体模倣ロボットにおいても、能動的な筋肉の働きが重要な要素となると予想される。

そこで本研究では、犬を対象に前肢のハンモック構造を含む四肢の筋骨格模倣を行う。細径 McKibben 型人工筋を用いてこれらの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。そのために、試作した筋骨格ロボット [12][13] を用いて、歩行動作を再現する実験を行なった。本稿では、歩容をトロットおよびペースとして行なった歩行実験について述べる。

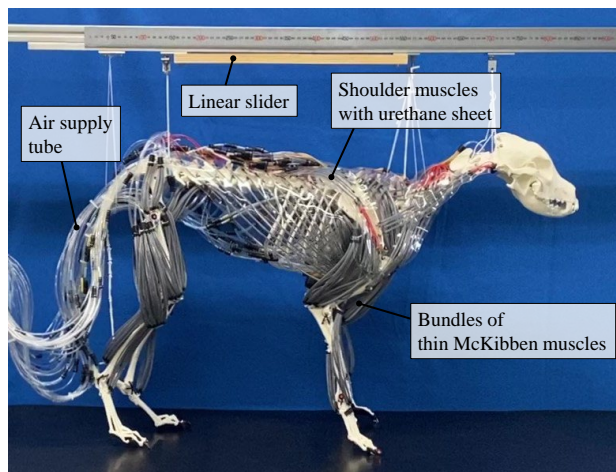


図1 犬の四肢の筋骨格ロボット

## 2. 製作した筋骨格ロボット

細径 McKibben 型人工筋 (EM20/EM40, 株式会社 s-muscle) を用いて、犬の四肢を対象に筋肉を模倣し、骨格標本 (中型雑種犬モデル, ERLER ZIMMER) に実際と同じ位置関係で取り付けられた。筋骨格ロボットの全体像を図1に示す。筋肉の形状や人工筋の本数は実際の筋肉の特徴に基づいて決定しており、各筋肉の様子を把握するために3D犬解剖学ソフトウェア (3D Dog Anatomy 2.05c, Biospehra) を用いた。前肢及び後肢の脚部は細径 McKibben 型人工筋を複数本束ねることにより、実際の筋繊維を模倣した。複数の人工筋を束ねることにより、実際の筋繊維を模倣するだけでなく、実際の生物と同様に多少の筋繊維が傷んでも正常な部分だけで問題なく働くことができるという利点がある。また、肩部の筋肉は体幹に沿って層状に重なる筋肉群であるため、ウレタンシートを用いて形状を模倣し、収縮方向に合わせて人工筋を接着した。肩部のハンモック構造を模倣するため、前肢部の骨と体幹部とはこれらのシート状の筋肉のみで接続されている。

## 3. 歩行実験

製作した筋骨格ロボットの四肢をそれぞれ駆動させて歩行動作の模倣を行なった。歩容はトロット (速歩)、ペース (側対歩) を対象とした。トロットは対角線上の脚が対となり、ペースは前後の脚が対となる歩容である。犬の歩行では同じ歩容でも速度に応じて立脚相の割合を示すデューティ比が多少変動するが、本実験では、トロット、ペースともに0.5とする。このときの

left forelimb	Blue	Yellow
left hindlimb	Yellow	Blue
right forelimb	Yellow	Blue
right hindlimb	Blue	Yellow

(a) Trot

left forelimb	Blue	Yellow
left hindlimb	Blue	Yellow
right forelimb	Yellow	Blue
right hindlimb	Yellow	Blue

(b) Pace

図2 トロットおよびペースの歩容. 青が立脚相, 黄色が遊脚相を示す.

	Stance phase						Swing phase			
	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii	ix	x
Forelimb	Serratus ventralis thoracis	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Rhomboid	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Superficial pectoral	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Deltoid	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Latissimus dorsi	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Trapezius cervical part	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Trapezius thoracic part	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Cleidocervical	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Deep pectoral	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Omotransverse	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Extensor carpi radialis	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Supraspinatus	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Triceps brachii	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Triceps brachii-long head	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Teres major	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	
Biceps brachii	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	
Deep digital flexor	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	
Hindlimb	Psoas major	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Middle gluteal	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Quadriceps femoris	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Biceps femoris	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Semitendinosus	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Cranial tibial	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	Gastrocnemius	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF

図3 各筋肉への入力パターン. 網掛け部分は人工筋に空圧が印加されている ON の状態を, それ以外は OFF の状態を表す.

歩行の1サイクルにおける各脚の立脚, 遊脚のパターンは図2に示す通りとなる. 前肢, 後肢への入力をそれぞれ図3に示す. この入力パターンは, OpenSimを用いた歩行時の筋活動シミュレーション結果[14]を参考に決定した. 歩容をウォーク(常歩, デューティ比0.6)とした歩行実験[13]と比較するため, 同一の入力パターンとし, デューティ比のみを調整した. 歩行の1サイクルは6sとし, それぞれの脚における立脚相, 遊脚相はそれぞれ3sずつである. 実験は自重を支えるため上部のリニアスライダから吊り下げを行い, 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と足裏にはゴムシートを使用した.

動作中の四肢の状態はトロットが図4, ペースが図5の通りとなり, いずれもx軸方向の前進を実現した. 図4に示したトロットの1サイクルにおける変位量は65mm, 図5に示したペースの1サイクルにおける変位量は105mmであった. 比較として, ウォークでは

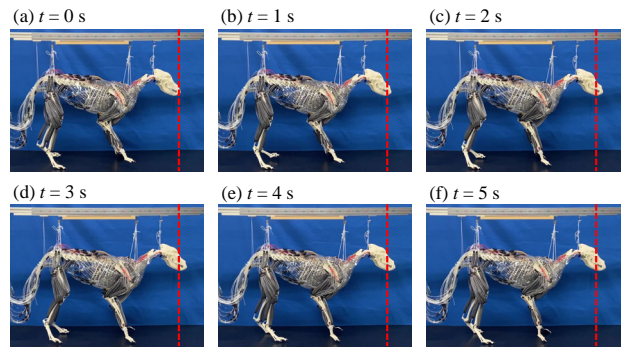


図4 トロットでの1サイクルの様子. 左前肢の着地を  $t = 0\text{ s}$  とする.

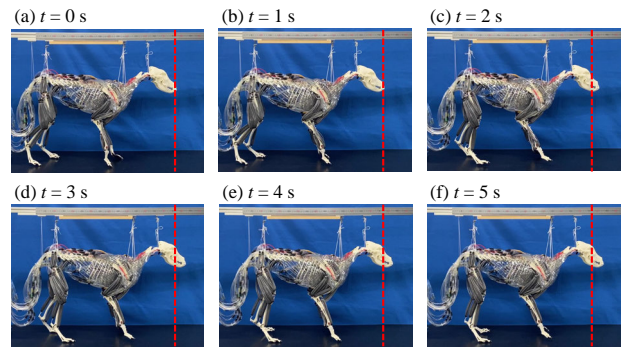


図5 ペースでの1サイクルの様子. 左前肢の着地を  $t = 0\text{ s}$  とする.

1サイクルあたり55mmの変位であった[13].

以上の結果から, 実際の歩行パターンに基づいて四肢を駆動させることにより, ウォークに加えトロット, ペースでも前進が可能であることが確認された. 実際には歩容によって筋肉の活動状態は異なると考えられるため, 今後速度や移動効率について考察するためには, それらを踏まえて実験を行う必要がある.

#### 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型人工筋を用いて製作した犬の四肢の筋骨格ロボットにおいて, 歩行実験を行なった. トロット, ペースを対象として, 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, 歩容による筋活動の差異も考慮してキャンター, ギャロップを含む様々な歩容での歩行動作の模倣を行い, 移動効率や筋活動の差異について考察する. また, 四肢だけでなく体幹部の筋肉群も模倣し, 歩行において背骨の屈曲による効果を調べる.

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] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Niihara, 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.
- [6] 羅基嫻, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 福原洗, 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.
- [12] 伊藤春那, 難波江博之, 原田恭治, 福原洗, 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.
- [13] 伊藤春那, 難波江博之, 原田恭治, 福原洗, 鈴森康一, 犬の筋骨格ロボットの歩行実験, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集* (2024), 2A1-Q08.
- [14] 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.