T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	運動する体幹を持つ筋骨格ロボットの歩行実験
Title(English)	Walking Experiment of a Musculoskeltal Robot with an Active trunk
著者(和文)	森翔汰, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴森康一
Authors(English)	Shota Mori, Hiroyuki Nabae, Yasuji Harada, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2025講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

運動する体幹を持つ筋骨格ロボットの歩行実験

Walking Experiment of a Musculoskeltal Robot with an Active trunk

○学　森翔汰 (Science Tokyo)　　正　難波江裕之 （Science Tokyo）
原田恭治（日獣大）　　正　鈴森康一（Science Tokyo）

Shota MORI, Science Tokyo, mori.s.f728@m.isct.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Science Tokyo,
HYasuji HARADA, Nippon Veterinary and Life Science University
Koichi SUZUMORI, Science Tokyo,

One of the purposes of biomimetics is to clarify biological mechanisms and movements. While previous studies have focused on mimicking dog forelimbs and hindlimbs to analyze efficient walking, few have examined the impact of trunk flexibility and multi-degree-of-freedom motion. However, medical research suggests that trunk muscles play a crucial role in locomotion. This study aims to replicate the musculoskeletal structure of a dog's trunk using thin McKibben pneumatic artificial muscles, which are lightweight and flexible even when contracted. A musculoskeletal robot was developed, and walking experiments were conducted under three conditions: relaxed trunk muscles, tensed trunk muscles, and actively driven lateral trunk motion. The results showed that active trunk motion increased the support triangle area and propulsion distance per cycle, indicating that torso movement enhances walking efficiency.

Key Words: Soft robot, Biomimetics, Musculoskeletal robot, Thin McKibben muscle

1　緒言

近年，動物がもつ構造や機能を模倣することで高性能なロボットを目指す，生体模倣というアプローチが注目されており，これまで，猫の神経や筋肉の特性を再現した歩行ロボット [1] やクモの運動機構を模倣した歩行ロボット [2] など，幅広い生物を模倣対象として研究が行われてきた．このように，進化の過程において最適化された生物の特徴的な構造，性質をロボットへと応用する側面がある一方，生体模倣は生物のもつ機構や運動を明らかにするという側面も持つ．これまでにも，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解明 [4] などの研究例が報告されている．本研究では犬の体幹部を対象として，運動における機能を理解することを目的とする．

生物がもつ柔軟さや動きのしなやかさは，従来のロボットで用いられる電磁モータ等の固いアクチュエータでは，モータ本体の剛性が高く，取り付け位置や向きといった取り回しも限定されるため再現が難しい．一方で，細径 McKibben 型人工筋 [5] は軽量で柔らかく，曲がった状態でも収縮が可能という特性を持っているため，生体模倣に適している．これまでにも人体 [6][7]，キリンの頸部 [8]，イヌの前肢 [9]，後肢 [10] などの筋骨格を模倣し，筋骨格系が持つ柔らかい身体構造や柔軟な動きを再現する研究が行われてきた．

細径 McKibben 型人工筋を用いてイヌの筋骨格構造を模倣した先行研究 [9][10] では，前肢の肩甲骨周辺のハンモック構造や後肢の筋骨格を再現した研究が行われている．これらの研究では，ロボットの歩行実験まで行っているものの，背骨部分は金属芯で固定されており，歩容における体幹の柔軟性は考慮されていない．一方で，実際のイヌの胴体は 13 の胸椎骨と 7 の腰椎骨からなり，背骨は多自由度な構造をしているため柔軟な姿勢を取ることができる．歩容の一つであるトロット時における軸上筋の機能を調べた研究 [11] では，体幹部の筋肉は姿勢維持に大きく寄与することが示されている．四肢と胴体の運動を結びつけているという点で体幹部は四肢動物の運動において中心的な役割を担っていると考えられる．また背骨に沿う形で存在する筋肉群が多自由度な背骨を安定化させ，歩行及び速歩の運動時に効果的な働きをすることが報告されている [12]．そのため，体幹部の筋肉は動物の運動に対して重要な要素の一つと考えられる．

そこで本研究では，イヌの体幹部に着目して筋骨格構造を模倣し，体幹の能動的運動が歩行運動へ及ぼす影響を明らかにすることを目指す．これまでに細径人工筋を用いて犬の体幹部の筋骨格ロボットを製作した．本稿では四肢の自由度を拘束した筋骨格ロボットを製作し，筋骨格ロボットによる歩行実験での体幹部の影響を述べる．

2　筋骨格ロボットの製作

製作した筋骨格ロボットを図 1 に示す．体幹部は骨格模型 (中型雑種犬モデル，ERLER ZIMMER) を用い，四肢は 3D printer(Mark Two, Markforged) を用いて造形し，それらを組み合わせることで製作した．イヌなどの下方型動物において伸筋が抗重力筋として作用すること [14] から，四肢の各部位で伸筋として働く位置に直径 4 mm の細径人工筋を配置した．また，四肢の各関節の可動域は実際のイヌの歩行動作における関節角度の時間変位の評価データ [13] を参考にして，関節角度の上限値，下限値をそれぞれ取れるように設計し，可動域を確保している．

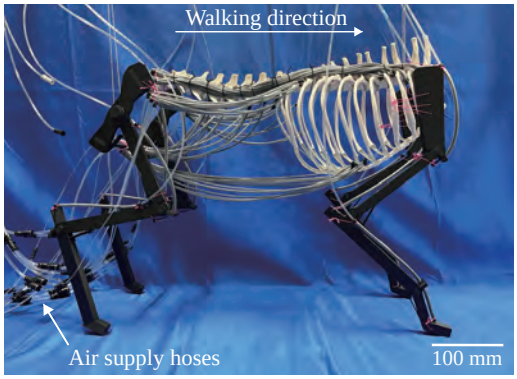

Fig.1 musculoskeletal robot

3　動作実験

製作した筋骨格ロボットを用いてクロール歩容での実験を行った．クロールとは常に 3 本以上の脚を接地させながら歩行する歩

容の中では最も遅い歩行パターンである．歩行周期は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 12 フェーズに分割し，デューティー比は 0.75 とした．歩行に対する体幹の影響を調べるために，駆動パターンとして，(a) 体幹部の筋肉を弛緩させた場合，(b) 体幹部の筋肉を緊張させた場合，(c) 体幹部を歩行に合わせて能動的に駆動した場合のパターンの 3 つのパターンで実験を行った．体幹の駆動方法については，遊脚する脚を持つ側の体幹部分の人工筋を，反対側の体幹部に比べて印加させる方法をとった．これは，実際のネコの歩行時において，後肢を支持する筋肉の反対側で筋活動の活性化を確認した先行研究 [15] に基づいて決定している．

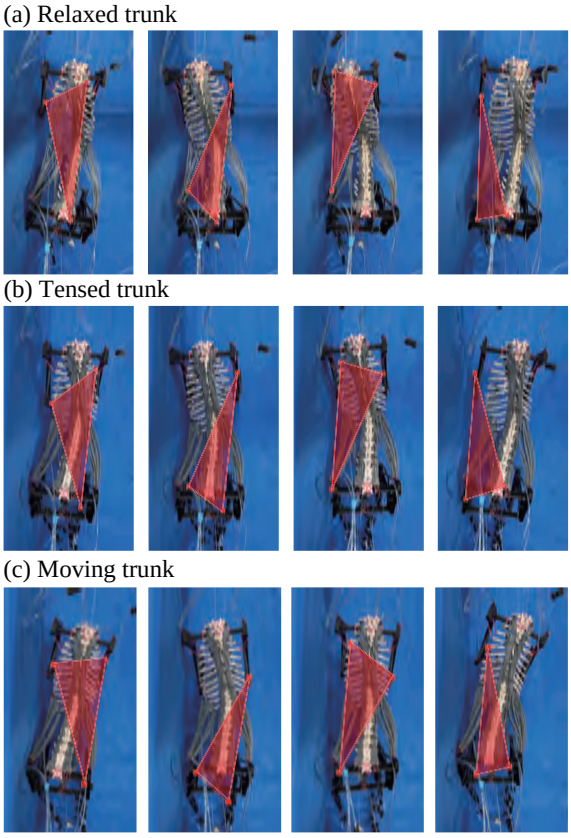

Fig.2 Top down view of a support triangle in a musculoskeletal robot walking experiment. (a)Top view of moving trunk. (b)Top view of Tensed trunk. (c)Top view of relaxed trunk.

3 つの条件下で駆動させた際の筋骨格ロボットの上部からの様子を図 2 に示す．図に示す赤色で囲まれた三角形は四肢のうち一つの脚が遊脚している状態での支持脚三角形を示しており，1 サイクルの中で 3 つのフェーズに分けられる遊脚期において，3 つのフェーズのうち中間に位置するタイミングで図示している．それぞれのパターンにおける支持脚三角形の平均面積，推進距離を表 1 に示す．ここで推進距離は基準点の絶対距離ではなく，進行方向とな方向への移動距離として定義し，計測を行った．

表 1 より，体幹を能動的に駆動させることにより支持脚三角形の面積および推進距離が増加することを示した．この結果は体幹の安定化および左右への湾曲が，筋骨格ロボットの重心を支持脚三角形により近づけたことや，体幹が安定化することで脚を前に出す動作をより安定して行うことができるようになったためと考えられる．一方で課題として，歩行周期を短縮した場合，体幹部分の人工筋の応答性が低いために，指令値までの印加が完了する前に．サイクルが進行していた．この原因として，体幹部分の人工筋は複数の人工筋を束にして模倣しており，使用している電空レギュレータで空圧を制御するにはレギュレータの流量が不十分となってしまうことや，人工筋へ空気圧を供給するための空圧用

Table 1 Average area of the support triangle and propulsion distance per cycle for the three patterns.

	Average support triangle area[mm²]	One cycle distance[mm]
(a) Relaxed trunk	1.72×10^4	69.5
(b) Tensed trunk	2.27×10^4	78.7
(c) Moving trunk	2.58×10^4	117

チューブの径が小さいことなどが考えられる．これについては，使用する電空レギュレータの容量が高いものに交換すること，体幹部分の模倣を 4 mm の人工筋にして供給するチューブの径を大きくすることなどで応答性の向上が見込まれ，クロールより速い歩容でも体幹の影響を検証できるようになることが期待される．

4 結言

本研究では，イヌの体幹部分が歩行に与える影響を理解するためにイヌの筋骨格構造を模倣し，筋骨格ロボットの設計および製作を行った．また，製作した筋骨格ロボットを用いて歩行実験を行った．体幹部を能動的に駆動させることで支持脚三角形のが増大すること，推進距離を増加することを確認した．今後は，様々な歩容でも歩行実験を行うとともに，イヌの体幹部がもつ歩行への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] Tanikawa, T., Masuda, Y., Ishikawa, M., A reciprocal excitatory reflex between extensors reproduces the prolongation of stance phase in walking cats: Analysis on a robotic platform. Frontiers in Neurorobotics(2021), Vol.15, p.636864.

[2] Yue, J., ”Biomimetic Wheeled-foot Robot Based on the Motion Mechanism of Moroccan Spider,”IEEE 5th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)(2022), pp. 623-627.

[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 (2022), Vol.12, No.1, p.11287.

[4] Yamada, Y., Nishikawa, S., Shida, K., Niiyama, R., 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] Wakimoto, S., Suzumori, K., Takeda, J., Flexible artificial muscle by bundle of mckibben fiber actuators. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)(2011), pp.457-462.

[6] Garriga-Casanovas, A., Hiramitsu, T., Baena, F. R., Suzumori, K.,et al., Multifilament pneumatic artificial muscles to mimic the human neck.IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)(2017), pp.809-816. IEEE.

[7] Kurumaya, S., Suzumori, K., Nabae, H., Wakimoto, S., Musculoskeletal lowerlimb robot driven by multifilament muscles. Robomech Journal, Vol. 3, pp.1-15, 2016.

[8] Niikura, A., Nabae, H., Endo, G., Gunji, M., Mori, K., Niiyama, R., Suzumori, K., Giraffe neck robot: First step toward a powerful and flexible robot prototyping based on giraffe anatomy. IEEE Robotics and Automation Letters(2022), Vol.7, No.2, pp. 3539-3546.

[9] 伊藤春那, 難波江裕之, 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系模倣, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (2023), 2j1-03.

[10] Na Gihyeok, 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] Ritter, D. A., Nassar, P. N., Fife, M., Carrier, D. R., Epaxial muscle function in trotting dogs. Journal of Experimental Biology(2001), Vol.204, No.17, pp. 3053-3064.

[12] Schilling, N., Carrier, D. R., Function of the epaxial muscles in walking, trotting and galloping dogs: implications for the evolution of epaxial muscle function in tetrapods. Journal of Experimental Biology(2010), Vol.213, No.9, pp. 1490-1502.

[13] 吉川和幸, 犬の歩行評価に活かす相分け概念の導入とその応用, 2021, 酪農学園大学博士論文

[14] 野村晋一, 沢崎坦, 茨木弟介, キネジオロジイの立場からみた犬の姿勢維持と歩行運動 V. 四肢主働関節の機構, 日本畜産学会報 (1966), Vol. 37, No7, pp 260-272.

[15] Wada, N. Akatani, J. Miyajima, N. Shimojo, K. Kanda, K., The role of vertebral column muscles in level versus upslope treadmill walking—An electromyographic and kinematic study, Brain research(2006), Vol.204, No.1, pp.99-109.