

細径人工筋を用いた犬前肢の筋骨格系模倣

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

空圧式細径人工筋肉と弾性膜を用いて犬の前肢を模倣した筋骨格ロボットを製作し、歩行時における立脚期と遊脚期の脚動作を再現した。四足歩行動物に特徴的な肩の柔軟な構造が、歩行動作において前肢全体の大きな運動を可能にしていることを確認した。

1. 緒言

近年、生物の身体形状に発想を得た四脚ロボットが世界的に開発されている [1]。しかし、速度やエネルギー効率、姿勢の安定性など様々な課題があり、実用化された例は少数である。そこで、環境に適応して進化してきた生物をより緻密に模倣することでこれらの課題解決につながる可能性がある。我々は生物の内部構造に着目し、これまでに人体 [2]、キリン頸部 [3]、犬後肢 [4] の模倣を行ってきた。軽量で柔らかい細径人工筋肉 [5] を用いることで生物らしい動きを実現している。本研究では犬の前肢に着目し、筋骨格系模倣を行う。

犬は鎖骨が退化しているため、前肢と体幹部とが筋肉のみで接続されており、前肢が支柱となり胴体が筋肉で吊り下げられるハンモック構造と呼ばれる構造をもつ [6]。したがって股関節で骨格的に繋がっている後肢とは異なり、柔軟な接続様式となっている。この前肢の柔軟な構造は高速で効率的な走行に特化したものであることが示唆されている [7]。同じく四足歩行動物である猫の肩部の筋肉をゴム膜で模したロボットでは、柔軟な肩を持つ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いる [8]。受動的な弾性要素のみでも肩部の柔軟な拘束による効果が一部見られたことから、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していると考えられる。しかし、実際には生物の筋肉は能動的に活動しており、アクチュエータとして働く。したがって、模倣した筋肉に能動的な機能をもたせることで、より動物らしい運動を再現することができると考えられる。

そこで本研究では、犬を対象として前肢及び肩周辺の筋肉を模倣し能動的に制御することにより、効率的な歩行や走行を実現する原理を明らかにすることを旨とする。本稿では製作した筋骨格ロボットの動作実験について述べる。

2. 犬前肢の筋骨格ロボットの製作

2.1 模倣した筋肉

前肢部は棘上筋、大円筋、上腕三頭筋、上腕二頭筋、橈側手根伸筋、深指屈筋の6つを再現した。これらは肩、肘、手根の関節の伸展・屈曲に関わる筋肉である。ただし、上腕三頭筋は4つの筋頭をもち、そのうち長頭と呼ばれる部位は肩甲骨に付着しており、他3つの部位は上腕骨に付着している。したがって、長頭は上腕三頭筋の主要な作用である肘の伸展だけでなく肩の屈曲にも寄与していると考えられる。歩行中の筋肉の

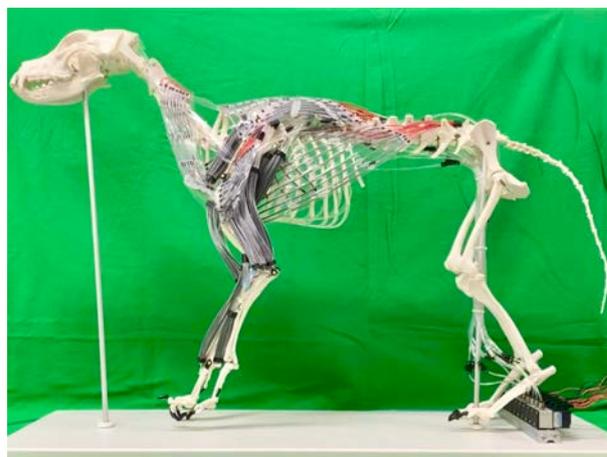


図1 犬前肢の筋骨格ロボット

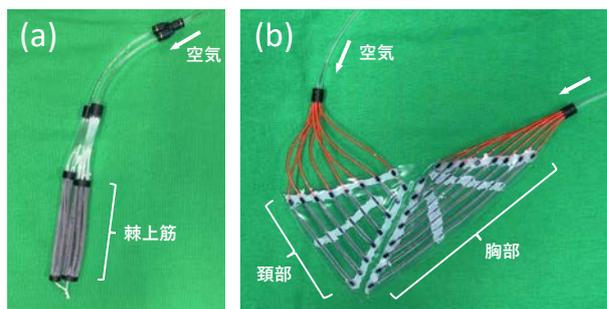


図2 作製した筋肉の例 (a) 前肢部棘上筋 (b) 肩部僧帽筋

活動に関するシミュレーション [9] においても活動期間が他3つの部位と異なっていたことから、本稿では上腕三頭筋長頭を一つの独立した筋肉として扱う。

次に肩部については胸腹鋸筋、広背筋、僧帽筋（胸部・頸部）、上腕頭筋、三角筋、浅胸筋、菱形筋、肩甲横突筋、深胸筋の10部位を再現した。これらの筋肉は胴体と前肢を引き寄せて姿勢を安定させたり、前肢を前後に引いたりする機能を持ち、前肢の運動に大きく関わっていると考えられる。

2.2 製作

図1に示すように、空圧式細径人工筋肉とシリコンシートを用いて筋肉の形状と機能を模倣し、骨格模型の左前肢部に実際と同じ位置関係で取り付けられた。

前肢部の各筋肉には外径2mmまたは4mmの人工筋を使用し、人工筋6-8本をひとまとめにした人工筋束を作製した。人工筋の外径と本数は実際の筋肉の大

表 1 1 ストライド周期における活動筋肉

	(i) 立脚期初期	(ii) 立脚期後期	(iii) リフトオフ時	(iv) 遊脚期初期	(v) 遊脚期後期
前肢部	橈腕手根伸筋 棘上筋 上腕三頭筋長頭	橈腕手根伸筋 棘上筋 上腕三頭筋長頭 上腕三頭筋	深指屈筋 上腕二頭筋 上腕三頭筋	深指屈筋 上腕二頭筋 大円筋	上腕二頭筋
肩部	胸腹筋 三角筋 僧帽筋胸部	胸腹筋 三角筋	浅胸筋 僧帽筋頸部	浅胸筋 僧帽筋頸部 僧帽筋胸部 広背筋	上腕二頭筋 僧帽筋頸部 広背筋

きさに基づいて決定した。図 2(a) は棘上筋の例で、人工筋 8 本からなる人工筋束を 2 本まとめて一つの筋肉とした。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。

肩部は厚さ 0.2 mm のシリコンシートと外径 2 mm の人工筋を用いて、薄いシート状で曲面形状を持つ筋肉を再現した。図 2(b) のように、それぞれの形状を模したシートに、収縮方向に合わせて人工筋を 8-12 本接着した。前肢と同様に本数は筋肉の大きさに基づいて決定した。僧帽筋、上腕頭筋、広背筋と似た機能を持つ菱形筋、肩甲横突筋、深胸筋の 3 部位は、同じシリコンシートで作製したが、人工筋は取り付けていない。全ての筋肉を能動的に制御すると複雑になるためである。前肢の骨と体幹部はこれらの 10 部位の筋肉を模したシートのみで接続されている。

3. 動作実験

0.4 MPa の空圧を印加して動作実験を行なった。歩行周期を (i) 立脚期初期 (ii) 立脚期後期 (iii) リフトオフ時 (iv) 遊脚期初期 (v) 遊脚期後期の 5 タームに分割し、各筋肉を表 1 の順で駆動させた。表 1 の筋肉の活動時期は歩行動作のシミュレーション [9] および筋電位の測定値 [10] に基づいて決定した。歩容によって筋肉の活動は異なる [10] が、ここではウォークと呼ばれる速度が小さい場合の歩容を対象とする。なお、実験は条件 (1) 前肢部の筋肉のみに空圧を印加した場合と、条件 (2) 肩部の筋肉にも印加した場合の 2 パターンで行なった。軌道を分析するため、それぞれの条件で同じ画角にて動画を撮影し、Adobe After Effect を用いてモーショントラッキングを行なった。頭部を支えるポールの接地点を原点とし、尾側方向を x 軸、背側方向を y 軸とする。

図 3 に各タームにおける状態と、図 4 に 1 ストライド周期における手根関節の軌道を示す。条件 (1) に比べて条件 (2) の場合は肩甲骨の可動域が大きくなった。それに伴って脚先も大きな軌道を描いた。(iii) リフトオフから (iv) 遊脚期初期にかけて、(2) では広背筋による前肢の後引作用が見られ、手根関節の位置も (1) に比べて後方に移動した。(iii) リフトオフから (v) 遊脚期後期にかけては、(2) では僧帽筋による挙上作用が見られた。(1) に比べて手根関節の位置が上昇し、遊脚状態が再現された。

以上の結果から、前肢の回転運動の支点が移動することで前肢全体の大きな運動が可能になっているといえる。これは股関節で拘束されている後肢には見られない現象である。

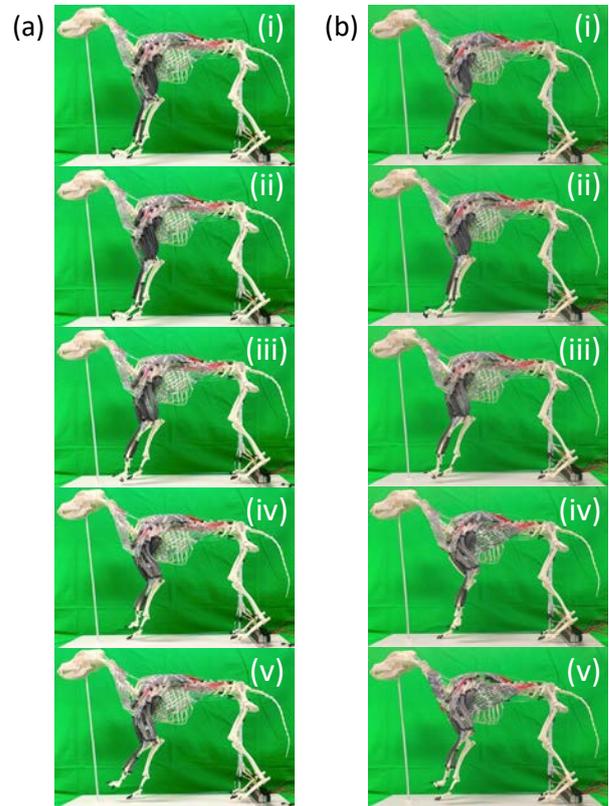


図 3 各タームにおける状態 (a) 条件 (1) 前肢部のみ駆動させた場合。(b) 条件 (2) 前肢部と肩部を駆動させた場合。

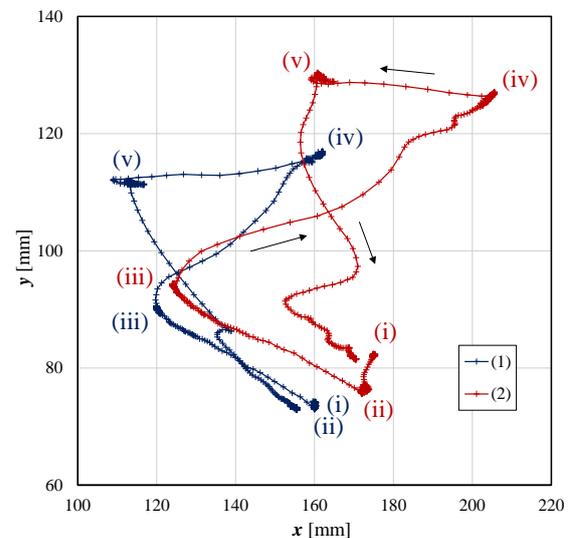


図 4 前肢の手根関節が描く軌道 (1) 前肢部のみ駆動させた場合。(2) 前肢部と肩部を駆動させた場合。

4. 結言

犬の左前肢の筋骨格ロボットを製作し、生体の複雑な構造と運動を人工筋を用いて再現した。前肢と体幹を接続する筋肉群を駆動させると肩甲骨の上下左右への移動が見られ、歩行動作において肩部の柔軟な構造が前肢の大きな運動を可能にしていることを確認した。

今後は現実の環境を想定して立脚期に地面反力を加えた場合の挙動について考察する。また、筋肉群の相互作用による体幹の安定化などの効果についても検討し、歩行の効率に及ぼす影響を明らかにする。

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] P. Biswal, P. K. Mohanty, “Development of quadruped walking robots: A review,” *Ain Shams Engineering Journal* Volume 12, Issue 2, June 2021, Pages 2017-2031, doi: 10.1016/j.asej.2020.11.005
- [2] S. Kurumaya, K. Suzumori, H. Nabae, S. Wakimoto, “Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles,” *Robomech Journal* 3, 18 (2016), doi: 10.1186/s40648-016-0061-3.
- [3] A. Niikura, H. Nabae, G. Endo, M. Gunji, K. Mori, R. Niiyama, K. Suzumori, “Giraffe Neck Robot: First Step Toward a Powerful and Flexible Robot Prototyping Based on Giraffe Anatomy,” in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 3539-3546, April 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3146611.
- [4] 羅基嫻, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴木康一, “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 2022*, 一般社団法人 日本機械学会.
- [5] S. Wakimoto, K. Suzumori and J. Takeda, “Flexible artificial muscle by bundle of McKibben fiber actuators,” 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Budapest, Hungary, 2011, pp. 457-462, doi: 10.1109/AIM.2011.6027056.
- [6] A. Fukuhara, M. Gunji, Y. Masuda, K. Tadakuma, and A. Ishiguro, “Development of Quadruped Robot That Can Exploit Shoulder Hammock Structure,” 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Honolulu, Hawaii, USA, January 12-15, 2020.
- [7] D. R. Carrier, S. M. Deban and T. Fischbein, “Locomotor function of the pectoral girdle ‘muscular sling’ in trotting dogs,” *The Journal of Experimental Biology* (2006) 209 (11): 2224–2237, doi:10.1242/jeb.02236.
- [8] 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 2022*, 一般社団法人 日本機械学会.
- [9] H. Stark, M. S. Fischer, A. Hunt, F. Young, R. Quinn and E. Andrada. “A three-dimensional musculoskeletal model of the dog,” *Science Report* 11, 11335 (2021), doi: 10.1038/s41598-021-90058-0.
- [10] S. M. Deban, N. Schilling and D. R. Carrier, “Activity of extrinsic limb muscles in dogs at walk, trot and gallop,” *The Journal of Experimental Biology* (2012) 215 (2): 287–300, doi: 10.1242/jeb.063230.