

四脚ロボットの柔軟な肩部ハンモック構造が走行運動に及ぼす影響

Effects of Flexible Shoulder Hammock Structure on Quadruped Robot Running

○ 福原 洸 (東北大) 郡司 芽久 (筑波大学) 正 増田 容一 (大阪大学)
 正 多田隈 建二郎 (東北大) 石黒 章夫 (東北大)

Akira FUKUHARA, Tohoku University, a.fukuhara@riec.tohoku.ac.jp
 Megu GUNJI, Tohoku University, Yoichi MASUDA, Osaka University,
 Kenjiro TADAKUMA, Tohoku University, Akio ISHIGURO, Tohoku University

Cursorial quadrupeds have sophisticated morphology with heterogeneity along with the lead to tail direction, realizing agile locomotor capabilities. This study aims to understand the functionality underlying the asymmetrical animal morphology to establish a new design principle beyond modern-day quadruped robots with homogeneous body structures. To this end, this study investigates the effects of flexible connectivity in the shoulder region (i.e., shoulder hammock structure) on quadrupedal running by using a simple mass-spring-damper robot system in the sagittal plane. The results suggest that flexible shoulder may reduce ground reaction force differences between the trailing and leading forelimbs in asymmetrical running gait (e.g., galloping gait).

Key Words: Quadruped robot, Bio-inspired robot, Anatomical structure, Shoulder hammock structure

1 緒言

一部の動物は、長い進化の過程を通じて、頭部から尾部にかけて前後非対称な身体構造を獲得し、高速かつ適応的な移動運動を実現している。例えば、ネコやウマなどの走行を得意とする動物では前肢と後肢の胴体部への接続様式が異なっている。後肢は胴体の股関節によって強固に接続されている一方で、前肢は筋肉を介して胴体に接続されている (図 1[1])。これによって、後肢が発生する大きな推進力を全身へ効率よく伝えるのみならず、前肢はその柔軟性から様々な環境変化に対して即時的に適応することができる。こうした動物の前後非対称な身体構造が持つ運動機能への影響を理解することができれば、同質の脚構造を有する従来の四脚ロボット [2] にはない、新たな自律移動ロボットの設計論の構築が期待される。

動物の柔軟な肩部 (前肢基部) による運動調整メカニズムを理解するため、これまでいくつかの運動タスクにおける動物の運動計測がなされてきた。例えば、Carrier らは、走行中のイヌの筋活動を計測することで、肩の周りの筋肉が様々な外乱 (体重の増加や外力など) に対して足先の運動を調整していることを示した [3, 4]。また、Zhang らは、ネコ科動物の高所からの着地運動を計測することで、前肢による衝撃吸収の重要性を示している [5]。これらの研究によって、それぞれの運動タスクにおける柔軟な肩部の重要性が示唆されているものの、動物の複雑な筋骨構造からロボットへ実装すべき解剖学的特徴や運動調整メカニズムの本質を抽出することは困難である。

そこで著者らはこれまで、動物の肩部の柔軟な接続構造を単純化したロボットモデルを構築し、シミュレーションやロボット実機によって、柔軟な脚基部の持つ運動調整機能を検討してきた。その結果、前肢基部の柔軟性が、高所からの着地における衝撃を緩和することや [6]、歩行中の前後脚の運動の齟齬を吸収し効率的な歩行運動へ貢献することを示してきた [7, 8, 9]。しかしながら、脚基部の柔軟性が走行運動に及ぼす影響についてはこれまで未検証であった。そこで本稿では、脚基部の柔軟性が四脚ロボットの走行へ及ぼす影響についてシミュレーションにて検証する。シミュレーション結果から、前肢基部の柔軟性が gallop 走行における左右脚の負荷状態の偏りを解消するように機能していることが示唆されたため、その検証結果について報告する。

2 ロボットモデル

走行を得意とする哺乳類の前肢基部は、前肢が胸部を複数の筋肉によってハンモックのように釣り上げる構造となっている (図 1)。例えば、前鋸筋 (serratus muscle) は、肩甲骨の内側面の背側の領域と胸部側面を接続する扇状の筋肉であり、体重支持において垂直方向の運動の調整を担っている [3, 10]。また、僧帽筋 (trapezius muscle) は、胴体の背側部から肩甲骨を包むように接続

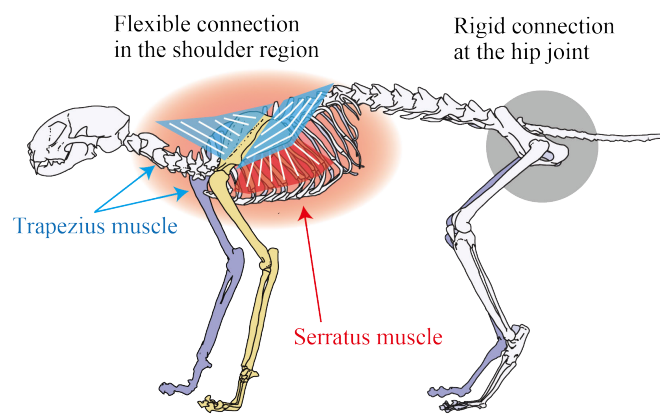


Fig.1 Anatomy of shoulder region of cursorial mammals.

しており、前肢の前後方向の運動を調整を担っている [3]。この柔軟な接続構造によって、前肢基部である肩甲骨は矢状面上を回転運動のみならず並進運動をすることができる。この並進方向の可動性は、ボール・アンド・ソケットによって接続されている後肢基部にはない、前肢特有の特徴である。

こうした前後脚の基部の柔軟性の非対称性が移動運動に与える影響を調べるため、著者らはこれまで上述のハンモック構造を模した脚部を有する四脚ロボットモデルを構築してきた (図 2) [7]。ロボットモデルは、矢状面上のバネ・ダンパ・質点系によって表現され、胴体部と前後 2 対の脚部によって構成される。脚基部の柔軟性の前後非対称性の影響を検証するため、前肢・後肢の両方の基部においてハンモック構造を有している。本モデルでのハンモック構造は、バネ・ダンパ要素によって脚部と胴体部を接続しており、バネ・ダンパ要素の配置は上述の動物の解剖学的知見を参考に設計している。具体的には、脚基部の前後方向の位置を保つ僧帽筋に対応するようにバネ・ダンパ要素を前後方向に配置し、脚基部の上下方向の位置を保つ前鋸筋に対応するようにバネ・ダンパ要素を上下方向に配置している。縦方向に配置したバネの剛性 $K_v^{\text{fore,hind}}$ と横方向に配置したバネの剛性 $K_h^{\text{fore,hind}}$ の値をそれぞれ調整することで、動物の脚基部にみられる柔軟な接続

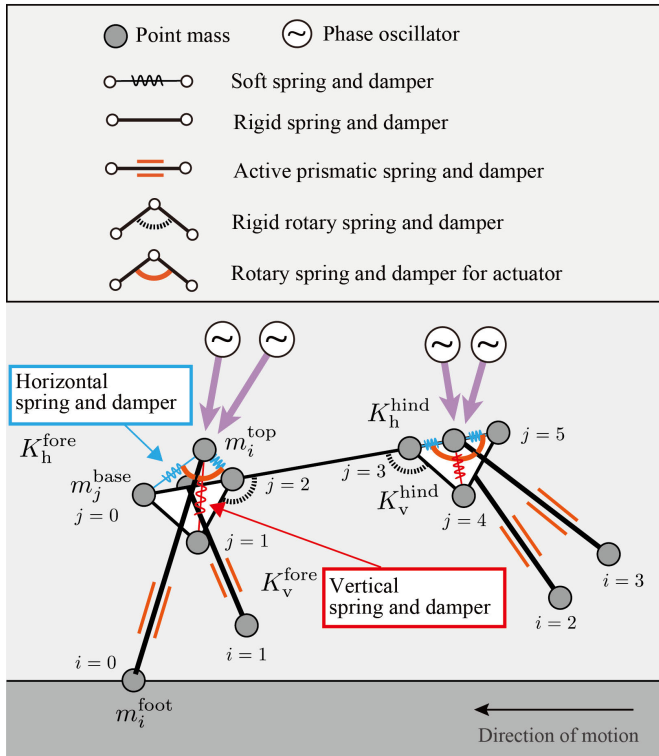


Fig.2 Quadruped robot model with hammock structure.

と強固な接続を実装することができる。モデルの詳細については先行研究 [7] を参照されたい。

著者らのこれまでの歩行シミュレーションの結果から、前肢基部の柔軟性によってロボットの胴体姿勢が安定し効率的な歩行運動が実現されることが示された [7]。ロボットの前脚と後脚がそれぞれ胴体部と強固に接続されている場合には、前後の脚の運動位相のズレによって胴体部のピッチ方向の姿勢変動が大きくなる。対して、前脚の基部が柔軟であった場合には、前肢基部の柔軟性が胴体部前方と後方に間に生じる上下運動の齟齬を吸収し、効率的な歩行運動が実現された。本稿では、走行運動を扱い前後非対称な脚基部の柔軟性が果たす役割を検討する。

3 シミュレーション実験

本稿では、シミュレーションによって四脚走行における脚基部の柔軟性の影響を検証する。四脚動物は、低速域の歩行や中速域の走行においては walk や trot, pace といった左右の足を交互に運ぶ対称歩容を示す一方で [11], 高速域の走行においては左右の脚をスキップのように協調させる gallop や、左右の脚を同期させる bound といった非対称歩容を示す [12, 13]。本稿では、四脚動物の典型的な走行パターンである gallop 歩容においてロボットを走行させ、脚基部の肩の柔軟性が走行速度に与える影響を確かめる。前肢基部の剛性 K_v^{fore} , K_h^{fore} と後肢基部の剛性 K_v^{hind} , K_h^{hind} はそれぞれ下記のように 2 つの変数 K^{fore} , K^{hind} によって表現する。

$$K_v^{\text{fore}} = K^{\text{fore}}, \quad (1)$$

$$K_h^{\text{fore}} = K^{\text{fore}}, \quad (2)$$

$$K_v^{\text{hind}} = K^{\text{hind}}, \quad (3)$$

$$K_h^{\text{hind}} = K^{\text{hind}}. \quad (4)$$

その他のロボットの身体パラメータは動物の生体物性 [14] を参考に設定し、脚のアクチュエータの制御変数や脚の軌道といった制御パラメータに関しては、前後脚の基部がそれぞれ高い剛性を持つ条件において trot 歩行が成立するように調整した (表 1)。パラメータと物理計算との対応は先行研究 [7] を参照されたい。

Table 1 Parameters in simulation. Definition of parameters is described in the previous study[7].

body			controller		
parameters	unit	values	parameters	unit	values
m_j^{base}	[kg]	3	ω_{sw}	[rad/s]	10.472
m_i^{foot}	[kg]	0.5	X^{offset}	[m]	0
m_i^{top}	[kg]	0.5	X^{amp}	[m]	0.25
total body mass	[kg]	22.0	Y^{offset}	[m]	0.7
trunk length	[m]	1.3	Y^{amp}	[m]	0.1
leg length	[m]	0.75	Y^{amp}	[m]	0.1
K_{pri}	[N/m]	2.5×10^3	D_f		0.3
D_{pri}	[Ns/m]	1.0×10^2	$\Delta\phi$		0.3
K_{rot}	[Nm/rad]	1.0×10^3			
D_{rot}	[Nms/rad]	5.0×10^1			
$K_{\text{pri}}^{\text{fix}}$	[N/s]	2.0×10^5			
$D_{\text{pri}}^{\text{fix}}$	[Ns/s]	5.0×10^2			
$K_{\text{rot}}^{\text{fix}}$	[Nm/rad]	1.6×10^4			
$D_{\text{rot}}^{\text{fix}}$	[Nms/rad]	1.0×10^3			
$K_{\text{v}}^{\text{fore}}$	[N/m]	$1.0 \times 10^{2 \sim 6}$			
$K_{\text{h}}^{\text{fore}}$	[N/m]	$1.0 \times 10^{2 \sim 6}$			
$K_{\text{v}}^{\text{hind}}$	[N/m]	$1.0 \times 10^{2 \sim 6}$			
$K_{\text{h}}^{\text{hind}}$	[N/m]	$1.0 \times 10^{2 \sim 6}$			
$D_{\text{v}}^{\text{fore}}$	[Ns/m]	2.0×10^1			
$D_{\text{v}}^{\text{hind}}$	[Ns/m]	2.0×10^1			
$D_{\text{h}}^{\text{fore}}$	[Ns/m]	2.0×10^1			
$D_{\text{h}}^{\text{hind}}$	[Ns/m]	2.0×10^1			
environment					
K_{gnd}	[N/m]	2.0×10^3			
D_{gnd}	[N/ms]	5.0×10^2			
μ	[Ns/m]	0.8			
β	[s/m]	5.0			

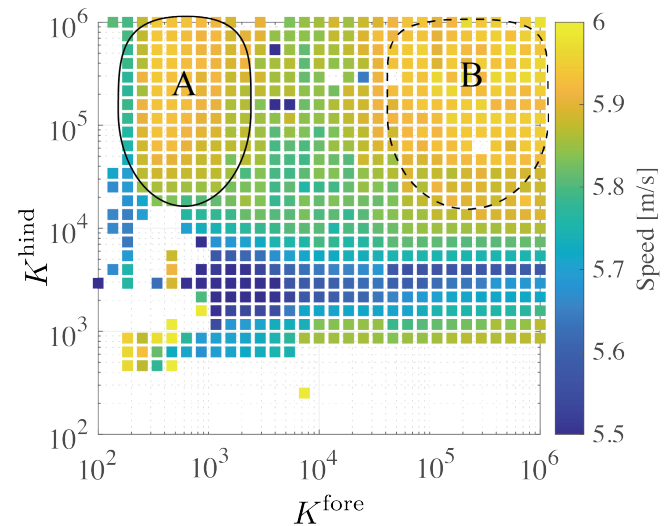


Fig.3 Effects of stiffness of the shoulder hammock structure in galloping gait. The robot achieves fast locomotion speed in two groups: Group (A) where the robot has the flexible shoulder and rigid hip connections, Group (B) where the robot has the rigid shoulder and rigid hip connections. The blank areas show that the robot fails to running due to falling.

また、それぞれの脚の運動軌道や脚の間の協調関係の設計については、附録 A を参照されたい。

シミュレーションの結果、gallop 走行するロボットは主に 2 つのグループの脚剛性の組み合わせにおいて高い走行速度を示した (図 3)。図 3 に示すグループ A においてロボットは、前脚が胴体部と柔軟に接続され、また後脚が胴体部と強固に接続されている。対して、同図のグループ B においてロボットは、前脚と後脚の両方において胴体と強固に接続されている。移動速度については、グループ A では $(K^{\text{fore}}, K^{\text{hind}}) = (10^{2.6}, 10^{5.6})$ にて最大速度 5.91 [m/s] を示し、グループ B では $(K^{\text{fore}}, K^{\text{hind}}) = (10^{5.4}, 10^{5.6})$

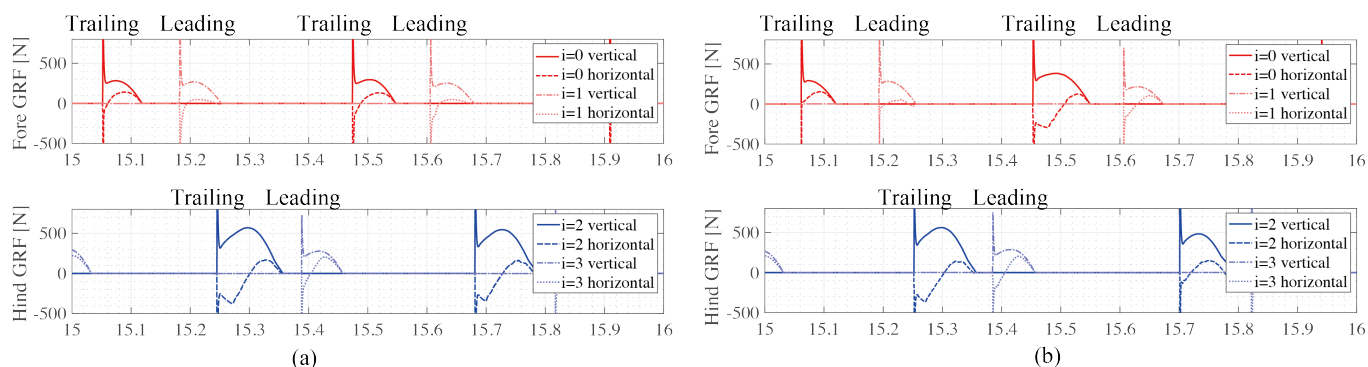


Fig.4 Ground reaction force (GRF) during galloping gait by the robot with (a) the flexible shoulder($K^{\text{fore}}, K^{\text{hind}}=(10^{2.6}, 10^{5.6})$) and (b) rigid shoulder($K^{\text{fore}}, K^{\text{hind}}=(10^{5.4}, 10^{5.6})$). Upper profiles shows GRF of forelimbs, bottom profiles shows GRF of hindlimbs.

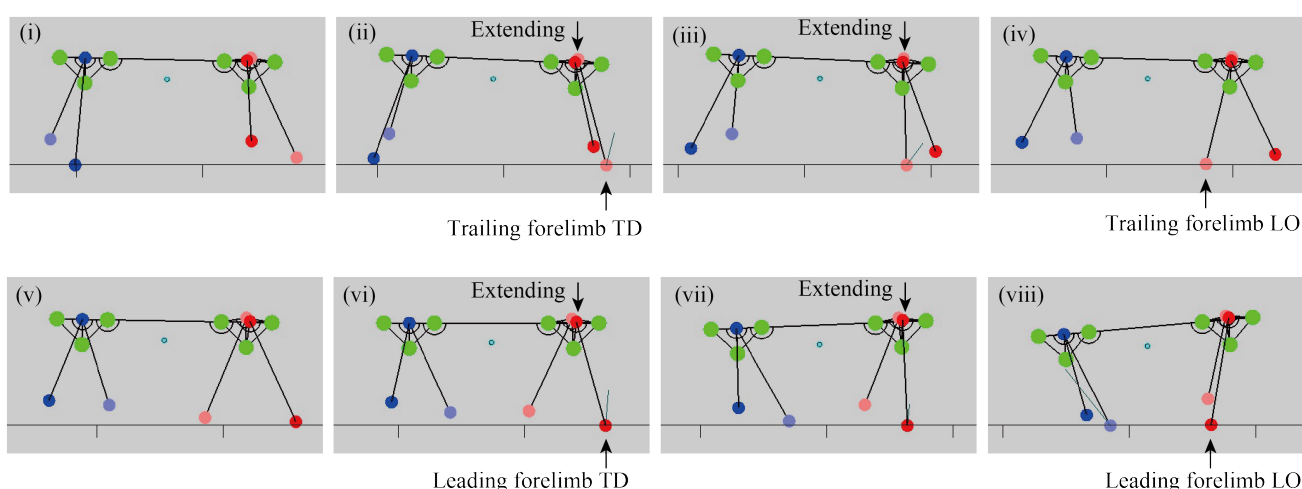


Fig.5 Snapshots of the galloping robot with flexible shoulders($K^{\text{fore}}, K^{\text{hind}}=(10^{2.6}, 10^{5.6})$). During the stance phase of the first touch-down forelimb (trailing forelimb), the shoulder region shows large deformation. In contrast, the shoulder of the second touch-down forelimb (leading forelimb) shows small deformation during the stance phase. TD; touching down, LO; lifting off.

にて最大速度 5.93 [m/s] を示し、両グループではほぼ同様の結果となった。シミュレーションにおいて高い移動速度を示した A・B どちらグループの身体においても、後肢基部は高い剛性を有しており、動物の股関節にみられる強固な接続と対応していると言える [1]。

柔軟な前肢基部を持つロボットと強固な前肢基部を持つロボットの走行を比較すると、前脚に生じる脚の負荷の左右差に大きな傾向の違いが見られた。前肢基部が強固な場合では、最初に地面に接地する前脚 (trailing forelimb) は肩の位置が低い状態で接地しており、脚に生じる負荷が高い状態にある (図 4(b) 上段)。一方、次に接地する前脚 (leading forelimb) では肩の位置がより高い位置で接地しているため、trailing forelimb に比べて脚の負荷が小さい。更に、前肢基部が強固なロボットの走行では、前脚の負荷の左右差が大きいストライドと小さいストライドが交互に繰り返された。これに対して、前肢基部が柔軟な場合では、左右の接地状態の非対称性に起因する前脚負荷の左右差を確認できるものの、その左右差は強固な前肢基部を持つ条件よりも小さい (図 4(a) 上段)。また、走行サイクルごとの負荷のばらつきも小さく、ロボットは安定な走行パターンを示した。

ロボットの前肢基部が柔軟な場合の走行の様子から (図 5)、左右で同質の柔軟性を持つ前脚が、接地状態に応じて異なる振舞いを示すことが確認された。具体的には、trailing forelimb の接地

時において前肢基部が大きな変形を示す一方で、leading forelimb の接地時では前肢基部の変形は小さい。これは、胴体部と地面との距離が近づく trailing forelimb においてより負荷が高いためである (図 4(a) 上段)。Trailing limb において脚基部が大きく変位し、前肢基部が強固なロボットにみられた大きな床反力の発生が抑えられていることから、急激な胴体の上下動を抑えられた安定した走行が実現されたと考えられる。以上のことから、前肢基部の柔軟性には、gallop などの非対称走行歩容において、接地時の胴体部の位置・姿勢の差異から生じる左右の脚の負荷の齟齬を解消する機能があると示唆される。

4 結言

本稿では、動物に見られる前脚と後脚の胴体への接続様式の差異が走行運動に及ぼす影響を明らかにするために、動物前肢基部のハンモック構造を模したロボットの gallop 走行をシミュレーションによって検証した。その結果、gallop 走行における前肢基部の柔軟性には、左右脚の非対称な接地状態に起因する支持脚中の負荷状態の齟齬を解消する働きがあることが示唆された。

今後は、開発中のロボット実機 [9] を用いることで、歩行・走行運動における脚基部の柔軟性が果たす機能を実世界環境にて検証する。また、跳躍や旋回などの運動タスクでの検証や、脚基部の並進運動のみならず回転運動も含めた機能の解明に取り組む。

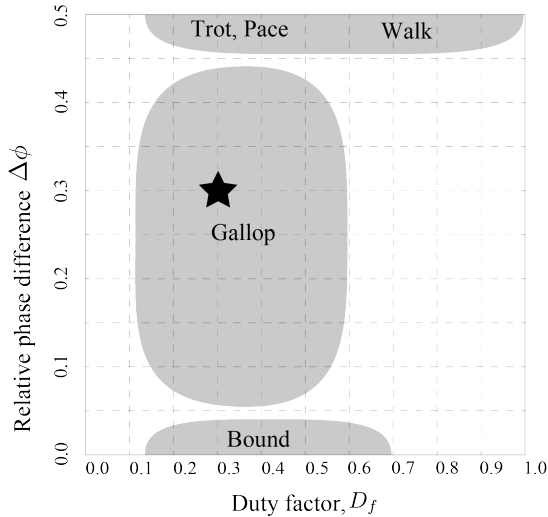


Fig.6 Diagram of quadrupedal interlimb coordination patterns. A marker represents the robot locomotor pattern in the experiments.

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JPMJCR14D5) の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

付録 A：四脚走行における脚間協調運動の表現

本ロボットモデルでは、各脚の周期的な運動を位相振動子の位相 ϕ_i によって表現する。振動子の位相は固有角速度 ω_i にしたがって発展し、 $\sin \phi_i > 0$ の時は足を前方へ振り戻す運動を、 $\sin \phi_i < 0$ の時は足を後方へ蹴り出す運動を行う。足先の軌道は一定の楕円軌道を追従するように制御される。運動軌道と位相との対応の詳細については、先行研究 [7] を参照されたい。

四脚動物の走行時に脚間協調運動を記述するパラメータとして、duty 比 D_f と左右の位相差 $\Delta\phi$ に着目する。Duty 比は 1 サイクル中に歩行周期に定める支持脚期の割合を示したものであり、歩行中では $D_f > 0.5$ 、走行中では $D_f < 0.5$ となる傾向がある。ここで duty 比は本来運動の結果求められる指標であるが、本研究ではロボットの走行パターンを設計する指標として用いる。具体的には、位相振動子の位相 ϕ_i が遊脚相にある場合 ($\sin \phi_i > 0$) と支持脚相にある場合 ($\sin \phi_i \leq 0$) とで固有角速度 ω_i の値を以下のようにそれぞれ設定し、1 サイクル中における支持脚相の割合が D_f となるように脚の運動位相を設計する。

$$\dot{\phi}_i = \omega_i, \quad (5)$$

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{sw} & (\sin \phi_i > 0), \\ \omega_{st} & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 ω_{sw} は遊脚期における固有角速度、 ω_{st} は支持脚期における固有角速度であり、それぞれ正の定数とする。走行を得意とする四脚動物の遊脚期の期間は移動速度の上昇に対して変化が小さいという知見 [13] に基づくと、遊脚相での固有角速度 ω_{sw} と duty 比 D_f の値から、支持脚相における固有角速度 ω_{st} と運動の 1 周期 T は以下のように求まる。

$$\omega_{st} = \frac{\omega_{sw}(1-D_f)}{D_f}, \quad (7)$$

$$T = \frac{\pi}{\omega_{st}} + \frac{\pi}{\omega_{sw}}. \quad (8)$$

また、脚の間の協調関係については、動物が示す左右の脚の運動位相差の観点から設計する。四脚動物は、低速、中速域の移

動移動では walk や trot, pace といった左右の足を交互に運ぶ対称歩容を示す一方で、高速域の走行運動では左右の脚をスキップのように協調させる gallop や、左右の脚を同期させる bound といった非対称歩容を示す [12]。1 サイクル中の運動を $0 \sim 1$ に正規化した場合、左右の脚の位相差は walk や trot などの対称歩容で $\Delta\phi = 0.5$ 、左右非対称な歩容である gallop では $0 < \Delta\phi < 0.5$ 、左右が同期する bound 歩容では $\Delta\phi = 0$ と記述できる。以上より、Duty 比 D_f と左右脚の位相差 $\Delta\phi$ の 2 変数から動物の歩容を整理すると図 6 に示すように表現できる。

本研究での gallop 歩容は、 $D_f = 0.3$ 、 $\Delta\phi = 0.3$ として脚の運動を設計する。具体的には、前脚の 1 つが支持脚相に突入する時刻を基準とすることで、前脚 ($i = 0, 1$) と後脚 ($i = 2, 3$) の初期位相は次のように求まる。

$$\phi_0^{\text{init}} = \pi, \quad (9)$$

$$\phi_1^{\text{init}} = \pi - \Delta\phi T \omega_{sw}, \quad (10)$$

$$\phi_2^{\text{init}} = \pi - 0.5T \omega_{sw}, \quad (11)$$

$$\phi_3^{\text{init}} = \begin{cases} \pi - (0.5 + \Delta\phi)T \omega_{sw}, & (\text{if } 1 - D_f > 0.5 + \Delta\phi), \\ \pi - (1.0 - \Delta\phi)T \omega_{sw} \\ - (0.5 + \Delta\phi - (1 - D_f))\omega_{st}, & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (12)$$

ただし、これらの脚間協調運動においては、前脚の基準となる脚 ($i = 0$) と後脚の基準となる脚 ($i = 2$) が逆位相であると単純化している。実際の動物は移動速度に応じて前後脚の協調関係も変化することに注意されたい [13]。

参考文献

- [1] P. David, "Limbs in mammalian evolution," 2007.
- [2] Boston Dynamics, "Introducing spot (previously spotmini)," <https://www.youtube.com/watch?v=tf71EVTDjng&feature=youtu.be>, 2016. Accessed: 2021-02-24.
- [3] D. Carrier, S. Deban, and T. Fischbein, "Locomotor function of the pectoral girdlemuscular sling in trotting dogs," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 11, pp. 2224–2237, 2006.
- [4] D. Carrier, S. Deban, and T. Fischbein, "Locomotor function of forelimb protractor and retractor muscles of dogs: evidence of strut-like behavior at the shoulder," *J Exp Biol*, vol. 211, no. Pt 1, pp. 150–62, 2008.
- [5] Z. Zhang, H. Yu, J. Yang, L. Wang, and L. Yang, "How cat lands: insights into contribution of the forelimbs and hindlimbs to attenuating impact force," *Chinese Science Bulletin*, vol. 59, no. 26, pp. 3325–3332, 2014.
- [6] A. Fukuhara, Y. Masuda, M. Gunji, K. Tadakuma, and A. Ishiguro, "Development of quadruped robot that can exploit shoulder hammock structure," in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1139–1143, IEEE, 2020.
- [7] A. Fukuhara, M. Gunji, Y. Masuda, K. Tadakuma, and A. Ishiguro, "A bio-inspired quadruped robot exploiting flexible shoulder for stable and efficient walking," in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 7832–7839, 2020.
- [8] 福原洗, 郡司芽久, 増田容一, 多田隈建二郎, and 石黒章夫, "肩帯の柔軟なハンモック構造を活用可能な四脚ロボットの開発," in *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020*, pp. 2P2–H17, 一般社団法人 日本機械学会, 2020.
- [9] 福原洗, 郡司芽久, 増田容一, 多田隈建二郎, and 石黒章夫, "柔軟な肩部ハンモック構造による四脚ロボットの歩行安定化," in *日本ロボット学会学術講演会予稿集 2020*, pp. RSJ2020AC3G1–02, 一般社団法人 日本ロボット学会, 2020.
- [10] R. Payne, P. Veenman, and A. Wilson, "The role of the extrinsic thoracic limb muscles in equine locomotion," *J Anat*, vol. 206, no. 2, pp. 193–204, 2005.
- [11] M. Hildebrand, "Symmetrical gaits of horses," *Science*, vol. 150, no. 3697, pp. 701–8, 1965.
- [12] R. Alexander and A. Jayes, "A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals," *Journal of Zoology*, vol. 201, no. 1, pp. 135–152, 2009.
- [13] L. Maes, M. Herbin, R. Hackert, V. Bels, and A. Abourachid, "Steady locomotion in dogs: temporal and associated spatial coordination patterns and the effect of speed," *J Exp Biol*, vol. 211, no. Pt 1, pp. 138–49, 2008.
- [14] A. Biewener and S. Patek, *Animal locomotion*. Oxford University Press, 2018.