四脚ロボット「Rush」を用いたバウンド歩容生成*

益田 俊樹^{*1}, 木村 浩^{*2}
末廣 尚士^{*3}, 高瀬 國克^{*1}

Emergence of a Bound Gait Using Quadruped Robot "Rush"

Toshiki MASUDA^{*4}, Hiroshi KIMURA,
Takashi SUEHIRO and Kunikatu TAKASE^{*4} Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

We have been studying on quadruped gait using our quadruped robot "Rush", which has rotational passive joints. Among quadruped gait, "bound gait" is simple and easy to emerge for quadruped robot. Thus, most of researches on quadruped robot running have dealt with bound gait. But, bound gait of most quadruped robot differed from four legged mammals. This paper shows that the bound gait similar to four legged mammals can realized by controlling the position of the center of gravity of the robot body in both simulations and actual experiments.

Key Words: Mechatronics, Moving Robot, Legged Locomotion, Bounded Gait, Quadruped Robot, Emergence of Gait

1. は じ め に

これまでに多くの四足動物の走行の研究が色々な面から行われている。四足動物が行う走行歩容は、プロンク¹、バウンド、跳躍付きのトロット²、跳躍付きのペース³、キャンター⁴、ギャロップ⁵などがある。この中でも四脚ロボットを用いた走行歩容の研究としては、バウンド歩容が単純で発生しやすいために多くの研究が行われている。バウンド歩容とは、左右の前脚と左右の後脚が跳躍期間を挟んで交互に地面に着地する歩容である。しかし、バウンド歩容を安定させて発生させる方法は制御面、機構面共に解明されていない。さらに、多くの四脚ロボットが発生させているバウンド歩容と動物が行うバウンド歩容とは異なっている。なぜこのように違いが生まれるのかはまだ不明である。

バウンド歩容の走行研究としては、Raibert ら⁽¹⁾の四脚ロボットの研究がよく知られている。Raibert らの研究の優れている点は、走行制御を跳躍高さ、前進速度、胴体姿勢の制御に分離し、それぞれの運動がリミットサイクルを構成するような簡単な制御則を与えた点、脚式走行の機構としてバネ-質量系を用いた点である。そして、動物が行うバウンド歩容やトロット

歩容を実現させている。しかし、なぜこれらの歩容が簡単な制御系や機構で発生し安定化できるのかは明らかにしなかった。Full ら⁽²⁾は、走行の安定性の研究で、筋肉や腱の持つバネ特性を利用して構成される受動ダイナミクス(バネ-質量系)が運動のリズムを生成することに注目した。その結果、CPG(Central Pattern Generator)のようなリズムジェネレータや位相調節のようなセンサフィードバックの必要なしで運動が生成されると主張している。このバネ-質量系における自己安定性に関する研究で、Seyfarth ら⁽³⁾は、SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum)と呼ばれる一脚モデルを用いて受動走行の安定な固定点を Matlab を用いて探索した。そして、胴体速度や跳躍高さなどをセンサで計測することなく、遊脚着地角度をある一定値に保つだけで運動が安定化されることを示した。このことを自己安定化(Self Stabilization)と呼ぶ。自己安定化の考えは四脚走行ロボットの研究に大きな影響を与え Talebi ら⁽⁴⁾は、「ScoutII」のような四脚走行ロボットを開発し、バウンド歩容を実現させている。さらに、Zhang ら⁽⁵⁾は、探索された固定点に収束させるために遅延フィードバック制御を用いて静止から定常状態になるまでのバウンド歩容の遷移を実現させている。しかし、詳細は後に述べるが、この二つの研究で発生したバウンド

* 原稿受付 2009年6月22日。

^{*1} 正員、電気通信大学情報システム学研究科(〒182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1)。^{*2} 正員、京都工芸繊維大学工学科学研究科(〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町)。^{*3} 電気通信大学情報システム学研究科。

E-mail: toshiki@taka.is.uec.ac.jp

¹ 四本の足が同時に着地し同時に離脱する歩容。² 対角の足が跳躍を挟んで交互に着地する歩容。³ 左側と右側の足が跳躍を挟んで交互に着地する歩容。⁴ 後述するギャロップの速度が遅くなった歩容。⁵ 1本の足が着地→跳躍を繰り返す歩容。

Fig. 1 Bound gait by quadruped robots

歩容は動物が行うバウンド歩容とは異なっていた。

そこで本研究では、より生物に近いモデルの四脚ロボット「Rush」を用いてこの動物が行うバウンド歩容を発生させると共に、なぜ動物が行うバウンド歩容が発生するかをシミュレーションや実機で検証した。

2. バウンド歩容

2.1 四脚ロボットにおけるバウンド歩容 バウンド歩容とは左右前脚、左右後脚が跳躍期間を挟んで交互に着地する歩容である。後脚が接地した後の跳躍期間のことを“Extended Flight Phase”⁽⁶⁾と呼び、また、前脚が接地した後の跳躍期間のことを“Gathered Flight Phase”と呼ぶ。これまでの四脚ロボットの研究により Zhang らは、図 1 に示すような時計回りで Extended Flight Phase のみのバウンド歩容を発生させ、Poulakakis ら⁽⁷⁾は、Extended Flight Phase のみや図 1 の反時計回りの Gathered Flight Phase のみのバウンド歩容を分けてシミュレーションにより検証している。そして、我々の過去の研究⁽⁹⁾では、簡単な制御法によって不安定なバウンド歩容から実機の脚長を変化させることによって Gathered Flight Phase タイプのみを発生させることができた。しかしながら、これらのバウンド歩容は図 1 中の 4 に示すような両脚支持期 (Double Legs Stance)⁶が存在し、云わば四脚ロボット限定で発生するバウンド歩容であり、四足動物ではこのようなバウンド歩容を発生させていない。

2.2 四足動物におけるバウンド歩容 四足動物が行うバウンド歩容とは、図 2 に示すような

1. 後脚接地

Fig. 2 Bound gait by legged mammals

2. 跳躍期間

3. 前脚接地

4. 跳躍期間

という順番でローテーションする歩容である。つまり、歩容一周期につき二回の Flight Phase があるということである。この一周期に二つの Flight Phase があるバウンド歩容をここでは、“Full Bound”と呼ぶことにする。このように、従来の四脚ロボットが行うバウンド歩容と動物が行うバウンド歩容は異なっていた。この Full Bound の研究としては、Poulakakis ら⁽⁸⁾は、シミュレーション上で制御パラメータを変えて胴体の角速度を上昇させることにより、発生させているが、実機での実現は成されていない。

3. 四脚走行モデルと四脚走行ロボット“Rush”

3.1 四脚走行モデル 本研究では、バウンド歩容の四脚走行を扱うために、図 3 に示すような矢状面内モデルを考える。このモデルは、剛体である胴体と膝関節にバネが付けられた二リンク脚二本により構成される。腰関節は能動関節で、膝関節は受動関節である。

3.2 四脚走行ロボット“Rush” 図 3 の走行モデルを元に図 4 に示すような四脚ロボット Rush を開発した。この Rush は、バネ-質量系として前後のそれぞれの脚の腰関節と膝関節を繋ぐ部分にバネが搭載されている。そして、各脚の腰関節に一つずつモータが搭載されており、腰関節が能動回転機構、膝関節が受動回転機構となっている。回転方向はいずれもピッチ方向である。Raibert らや Talebi らの四脚ロボットとの違いは、受動機構が直動ではなく回転機構を採用した

⁶前後左右すべての脚が同時に地面に着いている期間。

Fig. 3 Sagittal plane model

Fig. 4 Quadruped running robot : Rush. The size 38 cm in length and 20 cm in width. The height of stand is 20 cm.

ことである。実際の四足動物で脚機構が直動機構というのは存在しないので、Rush はより四足動物に近い機構といえる。足先には、接地情報を取得するために接地センサを搭載しており、コントローラ系はすべて胴体上にあり、電源のみ外部から供給している。全体の質量は 4.7kg となっている。その他の物理パラメータは表 1 に示す。

4. Full Bound 歩容生成

バネ-質量系の四脚ロボットにおける物理パラメータとは、胴体重量、胴体重心、脚長、バネ定数などが考えられる。我々の過去の研究で、前脚支持脚期間が非常に短かったために、脚長を変化させることによって前脚支持脚期間を長くした結果、不安定なバウンド歩容から Gathered Flight Phase のみのバウンド歩容を発生させることができたが、Full Bound は発生しなかった。そこで今回は、脚長よりバウンド歩容に影響を与えやすいと考えられる胴体重心位置を胴体の中心 ($L/2$) から変化させると Full Bound が発生するのではないかと

Table 1 Physical parameter of the quadruped robot Rush

parameter	value	units
Total mass	4.70	kg
L	0.38	m
Body width	0.20	m
l_1	0.14	m
l_2	0.16	m
Standing height	0.2	m
k_f	2.05	kN/m
k_h	3.03	kN/m

考え、歩容にどのような影響を与えるのかを Rush をモデル化したシミュレーションにより検証を行い、次に実機で検証をする。

4.1 制御手法 各脚の制御手法として、遊脚相と支持脚相を切り替えるための脚相 ϕ を以下の式のように与える。添字 $l = f, h$ であり、それぞれ前脚 (fore) と後脚 (hind) を表す。

$$\phi_l = \sin(\omega_l t + \varphi_l) + \phi_{0l}, \quad \omega_l = \frac{2\pi}{T_l} \quad (1)$$

ω_l は角速度、 φ_l は歩容を発生させるための初期位相、ここでは、バウンド歩容を生成させるために、前後で位相差 π を与えている。 ϕ_{0l} は、各脚の Duty 比を与えるオフセットであり、 T_l は周期である。

$\phi_l > 0$ の場合、遊脚相とみなし、以下の式を用いる。

$$\tau_l = K_p(\gamma_l - \gamma_l^o) + K_d \dot{\gamma}_l \quad (2)$$

γ_l^o は支持脚目標離脱角度、 K_p, K_d は支持脚の PD ゲインである。

$\phi_l < 0$ の場合、支持脚相とみなし、以下の PD 制御を用いて腰トルク τ_l を出力する。

$$\tau_l = K_p(\gamma_l - \gamma_l^d) + K_d \dot{\gamma}_l \quad (3)$$

γ_l^d は遊脚目標着地角度である。

4.2 シミュレーションによる検証

4.2.1 シミュレーションモデル 図 5 は図 3 に基づいて作成した四脚シミュレーションモデルを示す。シミュレーションソフトには「Webots6」を用いる。足先には実機同様、接地情報を測定するための接地センサを搭載している。

4.2.2 シミュレーション結果 前節で説明したモデルを利用し、胴体重心位置 ΔCOM を変化させることによってバウンド歩容がどのように変化するかのシミュレーションを行った。今回このシミュレーション

Fig. 5 Simulation model

Table 2 Values of the parameters used in simulations with running model

parameter	fore leg	hind leg
φ	0	π
ϕ_{0i}	0.16	0.09
$T(s)$	0.15	0.15
$\gamma^d(rad)$	0.00	-0.08
$\gamma^o(rad)$	-0.52	-0.52
(K_p, K_d)	(30, 2.00)	(30, 2.00)

では、30 秒間シミュレーションでモデルを走行させ、その 9 割が同一歩容であれば、その歩容が発生したと判断することにした。表 2 にシミュレーションで用いた制御パラメータを示す。

図 6 は、 ΔG によりバウンド歩容が変化した前脚と後脚の Duty 比の結果を示す。 ΔG は、図 3 により、胴体の中心 ($L/2$) からの + 方向の重心変位 ΔCOM と胴体長さ L で割った比

$$\Delta G = \frac{\Delta COM}{L} \quad (4)$$

である。Duty 比は、

$$Duty\ ratio = \frac{Stance\ period}{Stance\ period + Swing\ period} \quad (5)$$

で表される支持脚期間と遊脚期間で計算される比である。実線が前脚、点線が後脚の Duty 比を示す。

ΔG を増加させると、前脚の支持脚期間が長くなる。これにより、前脚の Duty 比が増加していることがわかる。 ΔG が、0 から 0.05 では、Extended Flight Phase のみや Gathered Flight Phase のみのバウンド歩容、また、前進するだけの不安定な歩容が発生していたが、0.05 から 0.18 までは Full Bound が発生した。 ΔG が 0.18 以上では、また不安定な歩容が発生した。 $\Delta G < 0$ の時は後ろに倒れてしまったのでデータとしては載せていない。

Fig. 6 Duty ratio result by simulation

Fig. 7 Contact result by simulation

これにより現在の二リンク能動受動機構のシミュレーションモデルにおいて、重心位置を適切な量だけ前方に移動すると Full Bound を発生させることがわかった。

図 7 は、 ΔG が 0.08 時 ($\Delta COM = 0.03m$) の前脚と後脚によって接地センサから得られた結果である。図 7 中の a は Gathered Flight Phase, b は後脚が接地した時間, c は Extended Flight Phase, d は前脚が接地した時間を表している。この結果によると、前脚の支持脚期間は短い、Gathered Flight Phase と Extended Flight Phase の両方が一周期に発生していることがわかる。この時の Duty 比は、前脚 0.17 後脚が 0.54 であった。

4.3 実機による実験 シミュレーションの結果を受けて次に実機による検証を行った。ここでは、図 4 に示した四脚ロボット Rush を用いた実験の結果を示す。しかし、胴体重心位置 ΔCOM を変化させることは実機では難しいので、制御系機器を胴体の前方に寄せた時の ΔG が 0.08 であったため、この値を用いて走行

Table 3 Values of the parameters used in experiments with Rush

parameter	fore leg	hind leg
φ	0	π
ϕ_{0l}	0.16	0.09
$T(s)$	0.15	0.15
$\gamma^d(rad)$	0.00	-0.17
$\gamma^o(rad)$	-0.52	-0.61
(K_p, K_d)	(30, 0.03)	(30, 0.03)

Fig. 8 experimental result by contact sensor

Fig. 9 Rush running by experiment

実験を行った。表3に実験で用いた制御パラメータを示す。図8は、接地センサにより測定された結果である。シミュレーションの接地結果に比べて、Gathered Flight Phaseが若干長くなっているが、Full Boundが発生していることがわかる。Duty比は前脚0.17後脚0.42であり、シミュレーションのDuty比の結果に比べ、後脚の値が低くなっている。図9はFull Bound発生実験によるスナップ写真である。

4.4 考察 今回のシミュレーションと実機実験では、後脚の目標着地角度 γ^d と目標離脱角度 γ^o の制御パラメータが若干違うもののほとんど同じパラメータでFull Boundが発生した。しかし、図7と図8を比較すると、シミュレーションでは、Gathered Flight PhaseよりExtended Flight Phaseのほうが長い、実機では、Extended Flight PhaseよりGathered Flight Phaseのほうが長い。この理由は、シミュレーションの胴体モデルと実機の胴体の違いにあると考えられる。Gathered Flight Phaseは、前脚と地面の衝突により発生するので、前脚のトルクや前脚の質量でGathered Flight Phaseの長さが決まる。シミュレーションでは、胴体の密度を一律に設定しているが、実機のほうではモータやギアが胴体の端に搭載されているために実機では、胴体の中心より両端のほうが重くなっている。要するにシミュレーションの胴体のモデルをさらに精密にすればこのような違いは生じないと考えられる。

他の研究では、Extended Flight PhaseとGathered Flight Phaseがどちらが長いかというと、Raibertら⁽¹⁰⁾のアニメーションとロボットによる研究では、Extended Flight PhaseよりGathered Flight Phaseのほうが長いという結果が得られている。これは我々の実機実験の結果と一致している。そして、この知見は一般的に四足動物において、前脚が減速(ブレーキ)、後脚は加速(トルク注入)の役割であることの説明を裏付けている。つまり、前脚と地面の衝突から始まるGathered Flight Phaseは、減速のために後脚に比べ、地面との衝突力が強く跳躍期間が長くなる。さらに、Krasnyら⁽⁶⁾の研究を参考にすると、後脚から跳躍期間に入るExtended Flight Phaseは加速の役割を担っているのでExtended Flight Phaseの間にトップスピードが発生するという結果が得られている。

5. おわりに

この論文では、二リンクの能動受動回転機構のバネ-質量系においてシミュレーションと実機により、動物が行っているバウンド歩容と同じFull Boundが発生させた。そして、本研究で用いたモデルにおいてのFull Boundが発生する要因として、胴体重心を変化させることでFull Boundが発生することがシミュレーションによりわかった。さらに、シミュレーション結果を用いて実機で一例ではあるがFull Boundを発生させた。しかし、胴体重心の変化がどのように歩容に影響を与えるのかのメカニズムについては、他のパラメータの影響が大きく現象が複雑なので十分には解明できなかった。

今後は、Extended Flight Phaseのみや Gathered Flight Phase のみのバウンド歩容がどのように Full Bound と関係しているかの条件を検証し、実機の Full Bound の評価や他の物理パラメータなどもシミュレーションで検証する予定である。さらに、一般的な脚機構における四脚モデルでも Full Bound の発生条件を見つけない。

謝 辞

本研究の一部は科研費・特定領域研究「移動知」：領域番号 454 の研究助成を受けて行われました。

文 献

- (1) Raibert, H. 1986. Legged Robots that Balance. *MIT Press*, (1986).
- (2) Full, R. et al., Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land, *The Journal of Experimental Biology*, Vol.202(1999), pp.3325-3332.
- (3) Seyfarth, A et al., A movement criterion for running, *The Journal of Biomechanics*, Vol.35(2002), pp.649-655.
- (4) Talebi, S et al., Quadruped Robot Running With a Bounding Gait, *International Symposium on Experimental Robotics*, Vol.271(2000), pp.281-289.
- (5) Zhang, Z. et al., Towards Realization of Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control, *International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1(2007), pp.4325-4330.
- (6) Krasny, P. et al., Generating high-speed dynamic running gaits in a quadruped robot using an evolutionary search, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, PART B: CYBERNETICS*, Vol.34(2004), pp.1685-1696.
- (7) Poulakakis, I. et al., On the Dynamics of Bounding and Extensions Towards the Half-Bound and the Gallop Gaits, *International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Vol.1(2003), pp.453-458.
- (8) Poulakakis, I. et al., On the Stability of the Passive Dynamics of Quadrupedal Running with a Bounding Gait, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.25(2006), pp.669-687.
- (9) Masuda, T. et al., Emergence of a Quadrupedal Bound Gait as Interaction among the Brain, Body and Environment, *SICE Annual Conference 2008*, Vol.1(2008), pp.2501-2506.
- (10) Raibert, H. et al., Animation of Dynamic Legged Locomotion, *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Vol.25(1991), pp.349-358.