

## 論文の内容の要旨

論文題目	四脚ロボット「Rush」を用いたバウンド歩容生成
学位申請者	益田俊樹

四足動物は様々な歩行と走行の歩容を生成し、それを用途に応じて切り替えて使っている。四足動物がどのようにして様々な歩容を生成・遷移させているかということを知ることが重要なことである。移動スピードとエネルギー効率についての研究では、四足動物は移動スピードに応じてエネルギー効率が良い歩容を選択しているという結果が示されている。四脚ロボットが様々な歩容を持つことは、四脚ロボットの効率的な移動にとって大事なことである。四脚ロボットの歩容に関して多くの研究があるが、走行歩容に関しては十分な研究がなされていない。四脚走行歩容には、プロンク、バウンド、トロット、ギャロップなどがある。神経生理学や四脚ロボットを用いた両面からどのように歩容が発生変化するかの研究が行われているが、そのメカニズムはまだ完全にはわかっていない。

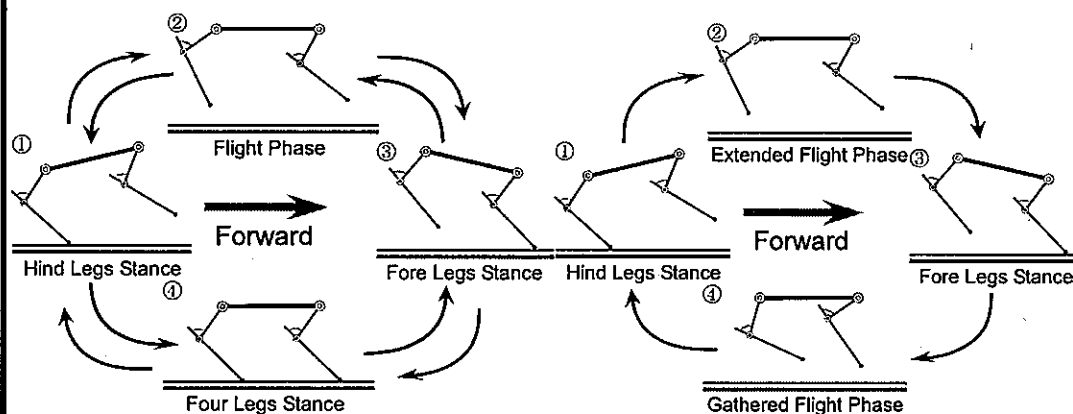


図1 ロボットのバウンド歩容

図2 動物のバウンド歩容

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は、後脚からFlight Phaseに入り、前脚着地し四脚支持期間(四脚すべてが着地する期間)となるような図1の時計回りのパターンになっている。後脚からFlight Phaseに入るようなFlight PhaseをExtended Flight Phaseと呼ぶ。そして前脚からFlight Phaseに入るようなFlight PhaseをGathered Flight Phaseと呼ぶ(図1の反時計回り)。一方、四足動物が発生させているバウンド歩容とは図2に示すような1周期にExtended、Gathered Flight Phaseの2

回のFlight Phaseが存在しているパターンとなっている。つまり、ロボットと動物のバウンド歩容の違いとは四脚支持期間があるかないかということである。本研究では、この動物が行うバウンド歩容を“Full Bound”と呼ぶことにする。このようにロボットと動物のバウンド歩容は異なっている。

本研究の目的は、バウンド歩容や“Full Bound”がどのように生成するかのメカニズムを「Rush」やシミュレーションを用いて明らかにすることである。そして、どのようにバウンド歩容が生成させられているかを明らかにする。

まず、バウンド歩容がどのように発生するかのメカニズムを調べるために、前後の位相差のない接地センサベースの制御を用いて四脚ロボット「Rush」がどのような歩容を発生させるかを調べる。そして、その歩容から物理パラメータを変化させることによってバウンド歩容を発生させる実験を四脚ロボット「Rush」を用いて行う。

この研究によって前後の位相差のない接地センサベースの制御を用いた場合、すべての脚が着地・離脱を繰り返すようなプロンク歩容が発生することがわかった。そして、プロンク歩容からバウンド歩容を発生させるために、物理パラメータである脚長を変えて実験を行ったところ、Extended Flight Phaseを持つバウンド歩容が発生した。さらに、脚長によるバウンド歩容の変化も示した。そして、バウンド歩容を発生させるための脚長が求まった。

次に、動物が発生させているバウンド歩容“Full Bound”がどのように発生しているかのメカニズムを明らかにするために、前後の位相差を与え、脚を周期的に動かすような制御を用いた。そして、今回は、四脚ロボット「Rush」やシミュレーションを用い、“Full Bound”がどのように発生させられているかを調べた。主に、物理パラメータや制御パラメータによってどのようにバウンド歩容に影響を与えるかを調べた。そして、シミュレーション結果を用いて“Full Bound”が発生する条件を求めた。

この研究により、胴体重心や脚周期を変更することによってバウンド歩容のパターン遷移を示した。そして、多くの四脚ロボットが行っているバウンド歩容から“Full Bound”に遷移することがわかった。その要因として、胴体重心を変更すると主に前脚の着地タイミングが変わり、“Full Bound”が発生する結果がシミュレーションにより得られた。そして、四脚ロボット「Rush」を用いて“Full Bound”が実現された。最後に、いくつかのシミュレーション結果から「Rush」における“Full Bound”が発生する条件が求まった。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 益田 俊樹

審査委員主査 末廣 尚士

委員 阪口 豊

委員 木田 隆

委員 森田 啓義

委員 渡辺 俊典

委員

委員

本論文は四脚走行歩容の1つであるバウンド歩容について研究を行ったものである。

第1章において、四足動物の歩容および四脚ロボットにおける歩容の研究を概観し、本研究で目的としている四脚ロボットでのバウンド歩容の実現の位置付けが論じられている。

第2章において、従来の歩容生成の研究を分類し、その中で本研究で行った四脚ロボットのバウンド歩容研究の意義を論じている。四脚ロボットの歩容の実現に関しては、(1)ロボットが動作する環境を含めたモデル化を行い、すべてを能動的に制御して歩容を実現するもの、(2)全く制御を行わずに、ロボットの機構と環境との相互作用で決まる物理現象として歩容を実現するもの、(3)ロボットに単純な動作制御を施し、それと環境との相互作用で決まる現象として歩容を実現するもの(半能動、半受動)がある。本研究は(3)の研究であり、単純な制御でバウンド歩容を実現することは四脚ロボットの移動方式として大きな意義がある。またこのような研究が、制御、機構、環境などのさまざまな条件が絡み合う中でいかにして歩容が発生し切り替わっていくかなど、歩容生成メカニズムを探求する上での一助となることを述べている。

第3章において、バウンド歩容を実現するための四脚モデルを提案し、それにしたがって開発した四脚走行ロボット「Rush」の機構的特徴や仕様、制御システムについて述べている。「Rush」は受動バネ関節を持つ四脚構造となっており(3)の半能動、半受動の歩容の研究に適している。またエネルギー蓄積機構のバネを持っているためバウンド歩容などの走行歩容を実現するのにも適したものとなっている。

第4章において、前後脚を独立に接地センサ情報のみを用いて制御する方式を用いて歩容生成を行った実験結果について述べている。この実験において当初はブロンクと呼ばれる歩容が発生していたが、物理パラメタである脚長を変化させることによりExtended Flight Phaseを持つバウンド歩容が発生することを示した。この実験においてロボットの物理パラメタを変化させることで歩容が変化して行

くこと、適切にパラメタを調整すればバウンド歩容が発生できることが明らかにされた。また同時にこの制御方式では接地センサの情報のみ用いて前後脚を独立に制御しているために、定常状態になるのに時間がかかるという問題点と、歩容の変化は主に物理パラメタの調整するしかないという問題点が示された。

第5章において、従来の四脚ロボットが実現しているバウンド歩容と実際の四足ロボットが行っているバウンド歩容（本論文ではこれをFull Boundと呼ぶ）との違いを説明し、四脚ロボット「Rush」でFull Boundを実現するための研究について述べている。Full Boundを生成するためには安定した歩容パターンの生成が重要であるため、前後脚に明示的に位相差180度を与えた周期制御を用い、その上で胴体重心位置や制御周期を変化させることにより歩容が変化していく様子をシミュレーションで明らかにした。シミュレーションにおいてFull Boundが発生する適切な胴体重心位置と制御周期の条件があることを明らかにした。また、シミュレーションに基づいて物理パラメタを調整し、適切な制御周期を定めることで実機の「Rush」においてもFull Boundを発生させることに成功した。

第6章において、Full Boundの発生条件を明確にするために、脚の接地時間やタイミングの変化がFull Boundの発生とどう関わっているか、また制御周期や胴体重心位置の変化と関わりの深い前後脚のバネ係数を変化させるとFull Bound発生領域がどのように変化していくかを、多数のシミュレーション実験を繰り返すことで明らかにした。また考察において単純化されたモデルとの比較を行い、バウンド歩容の発生メカニズムが単純なモデルでは説明することが難しいことを示した。

第7章においてまとめが行われ、半能動、半受動の単純な制御手法を用いて受動バネ関節を持つ四脚ロボット「Rush」においてFull Bound歩容を発生できることを示した。また「Rush」に関する多くのシミュレーションの結果から、本研究の結果が「Rush」という固有の四脚ロボットにとどまらず、従来の研究ではFull Boundを発生することが出来ていなかった類似の受動バネ関節を持つロボットに半能動、半受動の制御を適用した場合にも、Full Boundが発生する適切なパラメタが存在することが示唆されている。

以上のように、本研究は単に1つのロボットでFull Boundという新しい歩容を発生させただけでなくとどまらず、多数のシミュレーション結果を整理して示すことで他のロボットでの実現可能性を示唆するものであり、博士（工学）学位論文として十分な価値を有するものと認められる。