

京都大学	博士 (工学)	氏名	上村 知也
論文題目	Dynamical analysis of effects of body flexibility on quadrupedal running (四足動物の高速走行において体幹柔軟性がもたらす効果の動力学解析)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>四足動物は高速走行時においてギャロップ歩容を行う。生物の観察から、この歩容では体幹の構造的柔軟性が重要な役割を果たすことが指摘されてきた。しかし、体幹柔軟性が歩容に及ぼす力学的な効果は明らかにされていない。また、体幹柔軟性を利用した脚ロボットの設計論を構築するためには、生物の運動の力学原理を理解することが必要不可欠である。本論文は、シンプルなモデルを用いて本質的な力学を抜き出して解析するというアプローチにより、四足動物の高速走行において体幹柔軟性がもたらす影響とそのメカニズムを動力学的な視点から解析し考察した結果をまとめたものである。5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景として、四足動物のギャロップ歩容と体幹柔軟性の関係についての関連研究をまとめている。まず、本研究の手法である、シンプルなモデルを用いて生物の走行運動を動力学的に解析するアプローチと、その関連研究について説明している。そして、本論文の構成を述べている。</p> <p>第2章では、シンプルな平面2脚モデルのバウンド歩容において、体幹柔軟性が及ぼす影響を特に床反力に着目して調べている。ギャロップ歩容は左右の脚が非対称に動くという特徴を持つ。これに対して、バウンド歩容は、ギャロップ歩容における左右脚が完全に同期して動くとする歩容である。足にかかる床反力に対して体幹柔軟性が及ぼす効果を調べるため、体幹柔軟性を持つモデルと持たないモデルについて考察した。体幹柔軟性を持つモデルでは、体幹は2つの剛体からなり、それらはピッチ軸に回転するバネで結合されている。2つのモデルに対して保存系を仮定して、数値シミュレーションによって周期解を探索している。それぞれのモデルに対して得られた周期的歩容における最大床反力の比較を行った。その結果から、両モデルが同一の力学的エネルギーと水平方向の平均速度を持って運動するとき、体幹柔軟性を持つモデルが走行中に受ける床反力は、持たないモデルよりも小さくなることがわかった。すなわち、体幹柔軟性は床反力を低減する効果を持つことが示された。その一方で、体幹柔軟性を持つモデルの体幹バネ定数を変化させたとき、より硬いバネを使用したほうが、床反力が低減されるという結果も示された。</p> <p>第3章では、第2章で示した体幹柔軟性が床反力に与える効果について、そのメカニズムの解析を行った。体幹柔軟性が床反力を低減する効果を持つことと、体幹バネが硬くなるほど床反力が小さくなるという結果は、矛盾しているように見える。しかし、第2章で用いたモデルでは、その複雑さのため、メカニズムを完全に理解することは困難である。そこで本章では、モデルをさらにシンプル化し、これについて周期解を解析的に導出することで、上述の一見矛盾した現象が見られる原因を調べている。まず、モデルにいくつかの力学的拘束と仮定を課して支配方程式を線形化することで、新たな解析モデルを導出した。次に、線形化したモデルにおいて周期解として得られた解析解によって、2章では理解できなかった現象についての説明が与えられている。さらに解析解からは、運動の周期が決定されるにあたり、体幹柔軟性が重要な役割を果たすことが示された。この結果から、生物は移動速度に応じて適切に筋肉の柔軟性</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	上村 知也
<p>を調節し、速度に応じて適切な歩容周期を実現していることが示唆された。</p> <p>第4章では、生物が行う2種類のギャロップ歩容において、体幹の運動が異なるという現象のメカニズムが調べられている。生物のギャロップ歩容は2種類に分類される。チーターやイヌが行うロータリーギャロップと、ウマやバイソンが行うトランスバースギャロップである。ロータリーはトランスバースよりも高速での移動に用いられることが知られている。これらのギャロップには、飛翔期において差異が見られる。体幹を曲げる飛翔期はどちらにも存在するが、体幹を伸ばす飛翔期はロータリーにだけ存在する。すなわち、ロータリーには2種類の飛翔期が存在するが、トランスバースには1種類しか存在しない。この違いが生じる理由を明らかにするため、本章では、第3章の解析モデルを拡張した新たなシンプルモデルを提案している。周期解を解析的に導出した結果、2種類の飛翔期を持つためには、床反力に起因する体幹の角運動量の影響を低減することが重要であることが示された。解析解と動物が実際に走行する際の運動計測結果から、チーターは体幹を高速で動かすことで、角速度変化の影響を小さく抑え、これによって2種類の飛翔期が創発されることが示された。</p> <p>第5章は結論であり、本論文のまとめと、今後の課題について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、シンプルなモデルを用いて運動の本質的な力学を抜き出して解析するというアプローチにより、四足動物の高速走行において体幹柔軟性がもたらす影響とそのメカニズムを動力学的な視点から解析した結果をまとめたものであり、主な成果は以下の通りである。

1. 2 剛体をピッチ軸まわりに回転するバネで結合したシンプルな平面モデルを用いて、体幹柔軟性が床反力に及ぼす影響を調べた。体幹柔軟性を持つモデルと持たないモデルについて、数値計算によって周期解を探索した。その結果、両モデルが同一の力学的エネルギーを持って運動するとき、体幹柔軟性は床反力を低減する効果を持つことが示された。その一方で、柔軟性を持つモデルにおいて、体幹柔軟性をモデル化しているバネが硬いほど床反力が低減されるという結果も示された。
2. 項目1で残された課題である体幹柔軟性と床反力の関係を力学的に理解するため、よりシンプルなモデルの理論解析を行った。周期解を解析的に求めることで、体幹柔軟性が床反力を低減するメカニズムと、体幹バネが硬いほど床反力が低減するメカニズムをそれぞれ説明できた。また、周期解に基づいた考察から、生物は移動速度に応じて体幹の構造的柔軟性を調節することで、適切な周期を実現して走行している可能性が示唆された。
3. チーターのギャロップ歩容では体幹の変形が異なる2種類の飛翔期が見られるのに対し、ウマのギャロップ歩容では1種類の飛翔期しか見られない。シンプルな解析モデルの解析解と動物が実際に走行する際の運動計測結果から、チーターは体幹を高速に動かすことで、床反力が体幹の運動に及ぼす影響を小さく抑え、2種類の飛翔期が創発されているというメカニズムが明らかにされた。

以上要するに、本論文は四足動物や脚ロボットの高速走行において体幹柔軟性が与える役割とそのメカニズムについて動力学の視点から有用な知見を与えたものであり、その成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、論文内の一部に関して論文掲載が完了するまで、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。