

京都大学	博士 (工学)	氏名	安達 真永
論文題目	前額面上の運動に着目した四足歩行の動力学解析		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>脚で移動する生物は、様々な移動速度において適応的に歩容を変化させ、効率よく歩行・走行運動を行っている。近年ではこのような高い運動性能を期待し、脚ロボットの開発が進められている。脚ロボットの歩容選択の設計を行う際には、生物の歩行に内在するメカニズムが重要な手掛かりとなるが、前額面上の運動に関する力学原理は十分には明らかにされていない。本研究では、四足動物の胴体全体を常時地面に対して水平を保つトロット歩容に着目し、シンプルなモデルを用いたアプローチに基づき、前額面上の歩行を安定化する力学的メカニズムを、動力学の視点から解析し考察した結果をまとめたものであって、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、四足動物の歩行・走行に関係する研究をまとめている。次に、トロット歩容の特徴と関連研究についてペース歩容と比較しつつ紹介している。そして、胴体の相対運動と前後非対称性について、生物学および工学における関連研究についてまとめている。</p> <p>第2章では、トロット歩容およびペース歩容の3次元空間内での運動に着目し、シンプルな4脚モデルを用いて両者の運動の差異を調べている。両者は同じ並進速度において用いられる歩容であり、2本の脚を同時に動かすが、トロット歩容では対角線上、ペース歩容では左右同側にある前後脚が同期する。それぞれの脚の接地順をシミュレーションにより再現して受動歩行を実現させ、3次元空間内で現れる両者の力学的な差異について調べ、それらが主に前額面上で現れるかを検証した。具体的には、両者に対応する周期運動の安定性について進行速度や身体形状を変化させて比較を行った。その結果から、両者が同じ並進速度を持つとき、ペース歩容はトロット歩容よりも安定性が高いことが分かった。また、胴体の左右幅を変化させると、両者の安定性が大きく変化し、前額面上での胴体の回転運動が肝要であることが確かめられた。</p> <p>第3章では、トロット歩容とペース歩容の違いが明確に現れる前額面上の運動に着目し、安定性に関するメカニズムの解析を行った。トロット歩容はペース歩容よりも広く四足動物に用いられているため、安定性に関しても優れていると予測されるが、第2章で示した結果はこの予測と矛盾しているように見える。これは胴体の相対運動を考慮していなかったことが一因として考えられる。第2章にて、両者の差異は特に前額面上で顕在化することが示されたため、モデルの運動を前額面上に限定し、胴体をねじりバネによって繋がれた二つの剛体として表現する新たな力学モデルが構築されている。そして、両者に対応する周期運動の安定性について調べられている。まず、モデルの支配方程式を線形化し、両者に対応する周期解を解析的に導出した。次に、それらの安定性を解析的に計算し、比較した。その結果、ペースは胴体の慣性モーメントによって安定性が決定されるが、トロットはねじり関節の剛性を高めることで、慣性モーメントに依らず安定な運動を実現できることが分かった。さらに、両者の安定性が決定されるメカニズムは、脚の接地時における運動モードと胴体の慣性モーメントの関係性を用いて、統一的に説明できることが示された。この結果から、胴体の前額面での相対運動を活用することで、トロットでも安定した歩行を実現できることが示唆されている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	安達 真永
<p>第4章では、第3章で用いられたモデルに前後非対称性が導入され、前後非対称性がトロット歩容にもたらす力学的な効果について調べられている。第3章で用いられたモデルは前後対称であるが、実際の四足動物は前後非対称な身体構造を有しており、その非対称性が歩行・走行運動に及ぼす影響、特に前額面上の運動に対する影響についてはほとんど調べられておらず、不明な点が多い。本章では第3章のモデルの慣性モーメントや脚の剛性を前後で変えて前後非対称性を導入し、前額面上のトロット歩容に対する前後非対称性の力学的な効果について調べている。具体的には、モデルが対称の場合の周期解を基に、前後非対称性を持つ場合の周期解を数値シミュレーションによって探索した。その結果、非対称性によって前後脚の接地時間の大小関係が変化し、接地順に3つの異なるパターンが現れることが分かった。また、前後非対称性は前額面上のトロット歩容の安定性を悪化させず、むしろ改善することが示された。これらの結果は、四足動物がトロット歩容を用いる利点を示唆している。</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>			

氏名	安達真永
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、前額面での四足歩行の力学機序を明らかにするため、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を通して、前額面での胴体回転を抑制するトロット歩容を成立させる力学的メカニズムを動力学の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. 剛体の胴体と4本のバネからなるシンプルな3次元のモデルを用いて、前額面での胴体回転を抑制するトロット歩容と回転を有するペース歩容を、脚の接地順を指定して再現し、両歩容の3次元空間での振る舞いや安定性を数値計算によって調べている。その結果から、両者が同じ並進速度を持つとき、ペース歩容はトロット歩容よりも安定性が高いことが結論され、多くの四足動物がトロット歩容を用いる理由の解明には至らなかった。また、胴体の左右幅を変化させると、両者の安定性が大きく変化し、前額面上での胴体の回転運動が肝要であることが確かめられた。

2. 項目1で残された課題である胴体のねじりが前額面上の力学に与える効果を明らかにするために、ねじり関節を持つ前額面上のシンプルなモデルを新たに構築し、ねじりがトロット歩容とペース歩容に与える影響について理論解析を行っている。両歩容に相当する周期解とそれらの安定性を解析的に導出することで、胴体のねじりがトロット歩容を前額面上で安定化させる効果を持つことを明らかにし、その力学機序も説明している。また、周期解に基づく考察から、四足動物は胴体のねじりを活用して安定したトロット歩容を実現している可能性が示されている。

3. 項目2のモデルに前後非対称性を与えて実際の四足動物に近づけ、非対称性が前額面上のトロット歩容に与える影響について数値計算によって調べている。その結果、前後非対称性が実際の四足動物の脚の接地順を生み、さらにトロット歩容を安定化させる効果を持つことが明らかになり、様々な身体形状の四足動物によるトロット歩容の選択理由の一部が示唆されている。

以上要するに本論文は四足動物や脚ロボットの走行において胴体の相対運動が前額面上の安定性に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4年8月1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、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。