

京都大学	博士 (工学)	氏名	岡本 耕太
論文題目	Formation mechanism of spatial and temporal fractals in bipedal walking (二足歩行の空間的・時間的なフラクタルの形成メカニズム)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本研究は、二足歩行におけるフラクタル性を解析したものである。フラクタルとは、自己相似性および繰り返し構造を持つ性質を示す。自然界の様々な現象がこの性質を有しており、その構造を調べることは自然界の複雑な現象の理解に寄与する。二足歩行においてもフラクタル性が存在することが知られており、ゆるやかなスロープを受動的に歩き下っている状況での歩幅の変化の様子や、外乱環境下で安定な歩容の時間変化にこの性質が見られる。この 2 つのフラクタル性を、本論文では二足歩行の空間的フラクタル性、および時間的フラクタル性と呼び、それらの性質が発現する数理的な構造を明らかにしている。</p> <p>空間的フラクタル性は、自然界にも良くみられる性質であり、マンデルブロ集合のように全体的な概形と各部分を拡大した図形が常に似たような構造をしており、シンプルな関係から複雑な構造を形作る源となっている。受動歩行と呼ばれる力を加えない二足歩行においては、シンプルな力学的な運動であるにもかかわらず、その吸引領域にフラクタル構造が得られる。受動歩行における安定な歩行軌道は、環境の変化に応じて形が分岐し、異なる歩容を生み出すが、フラクタル性はこのようなダイナミクスの解軌道の多様性と深い関係がある。本論文では歩行の力学モデルのポアンカレ写像に着目し、どのような条件で吸引領域にフラクタルが発生するかを数理的に解析している。</p> <p>時間的フラクタル性とは、与えられた時系列信号が、大きな時間区間に対しても小さな時間区間に対しても同様な統計的性質を持つものとして定義される。この性質は人間の歩行の様子を解析するのに用いられており、例えば健常者と脳疾患を有する患者の間でこのフラクタル性が大きく変化することが知られており、運動機能を調べる医学的な指標となりうることが示唆されている。本研究では、シンプルな歩行モデルを用いた位相リセット制御による歩行のシミュレーションを通じて、位相リセットの効果がフラクタル性にどのような影響を与えるかを考察し、人間の歩行を数理的に解析する枠組みを構築している。</p> <p>第 1 章は緒言であり、本論文の背景と目的を説明している。特に自然界におけるフラクタル性の重要性と、カオス的なダイナミクスや微分方程式の解の分岐現象などとの関係について述べている。また空間的あるいは時間的なフラクタル性が、歩行の解析にどのように関連づけられているかを説明している。</p> <p>第 2 章は、ゆるやかなスロープを受動的に下り降りる 2 足歩行のダイナミクスを調べ、その吸引領域がフラクタル性を有する現象を調べている。歩行は一般的に多自由度のダイナミクスを有しかつ地面との接触もあり解析の難しい対象である。この複雑な運動に対して、コンパス型の 2 自由度の脚モデルと地面との衝突を用いたシンプル</p>			

なハイブリッドモデルを用い、適切な時間区間で切り取ったポアンカレ写像を離散化モデルとすることで目的の解析を可能としている。このモデルを用いた先行研究において、ポアンカレ写像の逆像によって定義域の引き伸ばしと折りたたみを繰り返すことで、ポアンカレ写像にフラクタルな吸引領域が生成されることが示されたが、吸引領域がフラクタルとなる条件やメカニズムは未解明であった。そこで、ポアンカレ写像の値域に着目し、ポアンカレ写像の逆像によって引き伸ばされ折り畳まれる領域を特定することで、吸引領域がフラクタルとなるために必要な条件とメカニズムを明らかにしている。

第 3 章では、歩き下るスロープの傾斜角を可変なパラメータとして、パラメータを変化させるにつれて吸引領域の大きさとフラクタル性が急激に変化することを数値的に示している。この解析においては、2つの隣り合う吸引領域の境界線が持つフラクタル性を示す指標として、不確定性指数を採用している。この指数が大きければ境界は複雑な構造を持ち高いフラクタル性を有することになる。傾斜角が変化すると、不確定性指数が急激に変化したり突然消滅したりするが、前章の解析手法を改良することで、吸引領域形成過程における引き伸ばしと折りたたみに基づいてそのメカニズムを明らかにしている。

第 4 章では、ヒトの歩行に見られる時間的なフラクタル性の出現と変化を調べている。神経制御系と身体力学系の複雑な相互作用の結果としてこのフラクタル性が出現するという仮説がある。先行研究において、位相リセット制御が歩行リズムのフラクタル性の形成に寄与していることが示唆されたが、モデルが複雑でありその原理には不明な点が多かった。そこでより本質的なメカニズムを解明するため、コンパス型のシンプルな身体力学モデルに対して、位相リセットとフィードフォワード制御のみを組み込んだ CPG (Central Pattern Generator) モデルからなるシンプルな神経制御モデルを構成している。まずこれらのシンプルなモデルを用いても、歩行リズムのフラクタル性を再現できることを示している。次に、位相リセットを行わないことで、加齢や神経疾患で観察されるようなフラクタル性の減少がもたらされていることを確認している。さらに、位相応答特性に基づいてこれらのメカニズムを明らかにしている。これらの結果は、ヒトの歩行における時間的なフラクタル性の出現と変化のメカニズムに対して重要な示唆を与えるものである。

最後に第 5 章では、結論として本論文の内容をまとめたあと、今後の展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、二足歩行における空間的フラクタル性および時間的フラクタル性の解析を行った。シンプルなコンパス型の歩行モデルを用い、脚と地面の衝突を含めたハイブリッドダイナミクスとしての挙動を調べることで、この解析を可能にした。得られた成果は次のとおりである。

緩やかなスロープを受動的に歩き下る受動歩行において、吸引領域が空間的なフラクタル性を有することが知られていたが、その発現の原理はよくわかっていなかった。本論文ではこの問題に対して、シンプルなコンパスモデルを用いたハイブリッドダイナミクスのポアンカレ写像を適切に構築することで、フラクタル性の発生メカニズムを明らかにした。このポアンカレ写像は、引き伸ばしと折りたたみの合成写像となっており、その繰り返しにより吸引領域が生成され、その収束先が安定な歩行軌道となる。本研究では、このポアンカレ写像の吸引領域を数値的に計算するアルゴリズムを与え、吸引領域がフラクタル構造を持つための条件を導いた。

さらに、受動歩行におけるスロープの傾斜角を可変パラメータとして、傾斜角を変化させた際に、吸引領域のフラクタル性がどう変化するかを数値的に調べている。複数の吸引領域の境界線の複雑さを評価できる不確定性指数に着目することで、フラクタル性の定量的な評価可能になった。さらにその変化の理由をポアンカレ写像の引き伸ばし・折りたたみ構造により説明し、受動歩行として安定に実現し得る吸引領域の複雑な構造を明らかにしている。

またヒトの歩行に見られる時間的フラクタル性についても調べている。健常者と脳疾患患者では時間的フラクタル性が異なり、前者の方がより強いフラクタル性を有していることが知られている。本研究では、健常者は適切な歩行制御を行っているという仮説のもと、位相リセット制御ありとなしの場合の時間的フラクタル性を、数値シミュレーションを用いて調べ、位相リセット等のフィードバック制御が歩行に重要な役割を果たしていることを示した。この成果は、歩行のフラクタル性解析の医療分野への応用の可能性を示唆している。

以上要するに、本論文は二足歩行という非線形ハイブリッドダイナミクスに対して、フラクタル性を解析する理論的かつ有用な手法を与えた研究であり、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6年2月21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。