

京都大学	博士 (工学)	氏名	竹森 達也
論文題目	Motion Design and Control of a Snake Robot in Complex Environments Based on a Continuous Curve Model (複雑環境におけるヘビ型ロボットの連続曲線モデルを用いた動作設計と制御)		

(論文内容の要旨)

生物のヘビは細長く手足のない単純な形態であるにも関わらず、不整地の移動や木登りといった多様な動作を実現して環境に適応している。このヘビのメカニズムを工学的に応用したヘビ型ロボットは、単純な構造でありながら多様なタスクを実現することが期待され、多くの研究がなされている。特に、レスキュー活動やインフラ点検において、人が進入することに危険が伴う環境での活用が期待されており、ヘビ型ロボットを多様な環境で活動可能にすることが求められている。しかし、ヘビ型ロボットは超冗長システムで制御が複雑なため、個々の環境に適合する動作を事前に全て設計し、多様な環境に対応することは困難であり、ヘビの持つ本来の能力を引き出すには至っていない。本論文では、ヘビ型ロボットを簡単な計算で環境に適合して動作させることを目的とし、連続曲線モデルに基づいたヘビ型ロボットの動作設計と制御について議論している。

本論文は5章からなり、各章の要旨は以下の通りである。

第1章は序論であり、ヘビ型ロボットの制御に関する研究をまとめ、ヘビ型ロボットの制御に用いられてきた多様な手法について説明している。特に、連続曲線モデルを用いた動作設計手法の特徴について説明し、本論文で連続曲線モデルに基づいて複雑環境におけるヘビ型ロボットの動作設計と制御について論じることの意義について述べている。

第2章では、単純形状を連結することによるヘビ型ロボットの動作設計手法を提案し、その適用例を示している。従来の連続曲線を用いた動作設計手法では、まず、一般的にデカルト座標系で記述される空間曲線の関数としてヘビ型ロボットの目標形状を定義する。つぎに、その連続曲線を、リンクを連結したヘビ型ロボットの離散的な形状で近似して、関節角を計算することで動作を設計してきた。しかし、より複雑な形状を汎用的な解析関数で表現することは困難である。また、目標形状に直線部分が含まれる場合には、近似計算が定義できないという問題がある。そこで、本論文では直線、円弧、螺旋といった単純な形状関数を連結し、ヘビ型ロボットの目標形状を表現する動作設計手法を提案している。この手法では各単純形状の特性が既知であるため、それらの組み合わせで直感的に複雑な目標形状を設計することができる。また、この表現手法に合わせたヘビ型ロボットの形状近似手法を提案し、簡単な計算によって目標関節角を求めることを可能としている。さらに、この動作設計手法を用いて、これまでヘビ型ロボットで未踏破だった環境を移動可能にしている。具体的に、配管上のフランジ乗越え動作、不整地を移動可能なクローラゲイト、梯子昇降動作を設計し、実験により有効性を示している。

第3章では、ヘビ型ロボットが異なる環境を跨いで移動するための動作遷移手法を構築している。ヘビ型ロボットが多様な環境を連続的に移動するためには、各環境に合わせて設計された動作を遷移させる必要がある。しかし、特定の環境に特化したヘビ型ロボットの動作は設計できるものの、それらの環境間を遷移する手法については研究がなされていない。本論文では、まず、跨いで移動する異環境の境界前後で両動作を成立させながら動作を遷移する条件を明らかにしている。つぎに、その条件を満たしつつ、多様な動作遷移を中継できる“輪くぐり動作”を提案している。輪くぐり動作は、ヘビ型ロボットが空間上に固定された仮想的な輪を頭から順にくぐり抜けるような動作である。ヘビ型ロボットは、この仮想輪が環境の境界に

京都大学	博士 (工学)	氏名	竹森 達也
<p>位置するように移動し、仮想輪をくぐり抜けた先から別動作に切り替えることで動作遷移を伴う異環境への移動が可能となる。さらに、輪くぐり動作の応用例として、狭所を通過する実験、および、不整地を移動した後に梯子に取り付く実験を行い、提案手法の有効性を示している。</p> <p>第4章では、断面形状が一樣でない直管にヘビ型ロボットが自律適応しながら、螺旋捻転動作で移動する手法を提案している。これまでに、ヘビ型ロボットの細長い体形を活かし、配管の内外に螺旋状に突っ張る、あるいは、巻き付く動作により摩擦力を生み、捻転動作によって移動する手法について多く研究されてきた。しかし、それらの研究のほとんどでは、配管の形状が事前にわかっている必要がある。径が未知の円形配管に適応可能な手法も提案されているが、配管形状が一樣であるなど適用範囲が限定的である。また、配管形状に合わせてヘビ型ロボット全体を一樣に変形させる手法も提案されているが、配管形状が不連続的に変化する場合には適応ができない。本論文では、これらの問題点を解決している。まず、動作中のヘビ型ロボットの複雑な形状を表現するために、螺旋形状を軸、断面形状、ピッチ角の3つのパラメータを用いて記述し、多様な螺旋形状を連続曲線モデルで簡単に表現する手法を提案している。つぎに、この手法に基づいて、現在の関節角から求めたヘビ型ロボットの離散的な形状から、逆に連続曲線を求めて配管の断面形状を推定し、関節角を推定形状に適合するように変化させる。それにより、ヘビ型ロボットの形状が局所的に配管形状に適応しながら、全体として螺旋捻転動作を成立させる手法を実現している。また、複雑な配管の内外を移動する実験を行い、その有効性を確認している。</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	竹森 達也
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

ヘビ型ロボットは単純な構造でありながら多様な環境への適応能力が期待されている。しかし、制御が困難な超冗長システムであるため、生物のヘビのもつ本来の能力を引き出すには至っていない。本論文は、ヘビ型ロボットが適用できる環境を拡大することを目的として、連続曲線モデルに基づいた動作設計と制御について考察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. 単純形状の連結によるヘビ型ロボットの動作設計手法の提案とその応用を行った。従来の動作設計手法では、ヘビ型ロボットの形状をデカルト座標系で記述された空間曲線である連続曲線モデルを用いて表すことが多いが、複雑な形状を汎用的な解析関数で表現することは困難である。そこで、直線、円弧、螺旋といった単純な形状関数を連結し、ヘビ型ロボットの目標形状を表現する動作設計手法を提案した。この手法では各々の形状関数の特性が既知であるため、それらの組合せで直感的に複雑な目標形状を設計できる。さらに、この動作設計手法を用いて、これまでヘビ型ロボットで未踏破だった環境を移動可能にした。具体的に、配管上のフランジ乗越え動作、不整地を移動可能なクローラゲイト、梯子昇降動作を設計し、実験により有効性を示した。
2. ヘビ型ロボットが異なる環境を跨いで移動するための動作遷移手法を構築した。ヘビ型ロボットが多様な環境を連続的に移動するためには、各環境に合わせて設計された動作を遷移させる必要がある。そのために、まず、跨いで移動する異環境の境界前後で両動作を成立させながら動作を遷移する条件を明らかにした。つぎに、その条件を満たしつつ、多様な動作遷移を中継できる“輪くぐり動作”を提案した。さらに、輪くぐり動作の応用例として、狭所を通過する実験、および、不整地を移動した後に梯子に取り付く実験を行い、提案手法の有効性を示した。
3. 断面形状が一樣でない直管にヘビ型ロボットが自律適応しながら、螺旋捻転動作で移動する手法を提案した。まず、複雑な動作形状を表現するために、螺旋形状を軸、断面形状、ピッチ角の3つのパラメータを用いて記述し、多様な断面形状を持つ螺旋形状を連続曲線モデルで簡単に表現する方法を提案した。つぎに、この方法に基づいて、現在の関節角から求めたヘビ型ロボットの離散的な形状から、逆に連続曲線を求めて配管の断面形状を推定し、関節角を推定形状に適合するように変化させる。これにより、ヘビ型ロボットの形状が局所的に配管形状に適応しながら、全体として螺旋捻転動作を成立させる手法を実現した。さらに、複雑な配管の内外を移動する実験を行い、その有効性を確認した。

以上要するに、本論文はヘビ型ロボットの制御の設計論について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3年8月17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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降