

氏名	翠 健仁		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第10269号		
学位授与年月日	令和4年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	アーチ型スナップモータのパワーフロー解析とその跳躍走行ロボットへの応用		
主査	筑波大学 教授	博士（情報科学）	望山 洋
副査	筑波大学 教授	博士（工学）	鈴木 健嗣
副査	筑波大学 准教授	博士（工学）	田中 文英
副査	筑波大学 教授	博士（工学）	相山 康道
副査	立命館大学 教授	工学博士	平井 慎一

論文の要旨

審査対象論文は、コンパクトな移動ロボットが、走行と跳躍を効果的に組み合わせ、段差のある環境を巧みに移動する動作を“跳躍走行”と定義した上で、この跳躍走行を実現するための機構と、設計のための解析方法、さらには、具体的な跳躍走行タスクについて論じている。

前半では、跳躍走行を実現するための機構として、弾性体の飛び移り座屈を利用したアーチ形スナップモータと呼ばれる撃力発生機構を、詳細に検討している。アーチ形スナップモータは、大きな撃力を高い繰り返し周波数で発生できるソフトロボット機構である。しかし、弾性ロッドの空間的な大変形に基づく現象によりもたらされる機能であるため、その解析が複雑で、設計指針を示すことが困難であった。この問題に対して、弾性ロッドを支えるフレームの柔軟性を取り入れた、弾性ロッドの大変形シミュレータを実現し、アーチ形スナップモータのエネルギー遷移とパワーとの関係を明らかにしている。これにより、アーチ形スナップモータのより良い設計が可能となることを示している。

後半では、このアーチ形スナップモータのパワーフロー解析を踏まえて、跳躍走行の2つのタスクを例示している。その一つは、階段を走破するときに見られる、繰り返し跳躍である。車輪走行系を含めた機体をパワーフロー解析に基づき設計し、バッテリー・コントローラは非搭載であるが、15センチメートルの階段を、1.6ヘルツの繰り返し周波数で、踏破することに成功している。もう一つの跳躍走行のタスクは、走行のスピードを落とさずに跳躍を行う、走行中跳躍である。パワーフローの観点から合理的な機体によって、アーチ形スナップモータによって生成される撃力を大きく損なうことなく、車輪走行を行いながら跳躍を行い、ロボットの全長20センチを超える幅を飛び越えることに成功している。これら2つの跳躍走行タスクにより、小型移動ロボットの移動可能範囲を広げると共に、段差のある環境における移動効率を向上させることができると結論付けている。

審査の要旨

【批評】

本論文では、コンパクトな移動ロボットにおいて、走行と跳躍を効果的に組み合わせる“跳躍走行”という、新しいロボット移動の概念が提唱されている。これまで、ロボティクスにおいて、走行動作と跳躍動作は、特にコンパクトな移動ロボットにおいては、独立に行われることが常識的であった。その理由は、十分な走行能力を有する機構と、跳躍という、単純でありながら、瞬発力を有する機構の同時実現が困難であったためである。本論文では、アーチ形スナップモータと呼ばれる、ソフトロボット機構が採用されている。アーチ形スナップモータは、既に提案されていた機構であるが、連続体の大変形を予測することが難しく、設計が困難であり、耐久性にも問題があった。本論文は、撃力を生み出す弾性ロッドを支えるフレームの柔軟性が、撃力発生そのものにおいて重要な役割を担っているという洞察に基づき、この問題を巧みに解決している。この結果、パワーフロー解析という、このソフトロボット機構の全体像を把握するための解析の枠組みをもたらした。パワーフロー解析により、よりよい機能の追求が可能となり、アーチ形スナップモータという撃力発生機構を利用する活路が拓かれた点が、本論文のもっとも主要な貢献である。

本論文の後半では、アーチ形スナップモータのパワーフロー解析に基づき、これまでには実現が難しかった、跳躍走行の2つのタスクの実現が、定量的データと共に報告されている。繰り返し跳躍は、我々の身の回りの典型的な環境の一つである階段を素早く走破することを可能とする。アーチ形スナップモータと車輪走行系を組み合わせた機構によって、バッテリーとコントローラは非搭載ではあるものの、一段当たり0.6秒という素早さで、階段走破に成功している。走行系を備えたコンパクトな移動ロボットによる階段走破はこれまでになく、ロボティクスにおける独創性の高い研究成果である。さらに、車輪走行のスピードを大きく損なわずに、ロボットの全長20センチを超える幅を飛び越える走行中跳躍も実現している。車輪走行系を備えたコンパクトな移動ロボットによる、走行中跳躍は、段差のある環境において、極めて効率の良い移動性能をもたらす。これも、ロボティクスにおける、斬新な研究成果と認められる。

なお、これら跳躍走行の有益なタスクは、弾性ロッドの空間的大変形を伴う飛び移り座屈によって実現されている。本論文で示された飛び移り座屈のパワーフロー解析は準静的であり、今後ダイナミクスへの展開が期待されるところではあるが、大きく変形する柔軟な機構がもたらす機能の実現という意味で、ソフトロボティクスにおける大きな貢献としても位置付けられる。

以上のことから、本論文は、ロボティクスの発展に寄与する価値ある研究成果と認められる。

【最終試験の結果】

令和4年2月9日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。