

報告番号	甲 第 14076 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 パルスドライブ変速原理に関する研究
(A study on pulse drive transmission)

氏 名 土屋 英滋

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、「パルスドライブ」と名付けた新しい変速原理を提案し、その定式化および実験による基本的な原理検証を行った。この「パルスドライブ」は、機械と電気および変速機と変圧器の類似性に着目して考案した変速原理であり、変圧器においてスイッチング技術による小型高効率化が実現されたように、機械の分野の変速機でも同様の技術革新を起こすことを目指した原理である。本研究は、そのような技術革新の第一歩として「スイッチング制御を用いた変速機の提案および実験的検証」を目的としており、本論文は下記の構成から成る。

第1章では、本論文の緒論として、研究の背景および目的を説明している。温室効果ガスの排出量削減のために、自動車への要求として、内燃機関を用いた自動車であっても、電動自動車であっても、パワートレーンの高効率化が求められていること、およびその中で変速機が重要な役割を果たしていることを説明している。その上で、これまでの変速機に関する研究を俯瞰的にとらえた場合、変速機の技術は「半径の比による変速」と「すべりによる変速」に分けることができ、それぞれの技術に対して、小型高効率化が進められていることを説明している。

さらに、機械系と電気系に類似性があるにもかかわらず、変圧器の分野で革新的な小型高効率化を実現したスイッチング制御を用いたパワー変換の発想が、変速機の分野にはなかったことを説明している。そして、そのような電気の分野での技術革新に類似した、新たな変速原理を創案することが、将来的に小型高効率な変速原理を実現する可能性について述べている。最終的にこれらの考えを踏まえ、本研究では、スイッチング制御と同様の間欠駆動によるトルク伝達および制御の実現を目標とした。

第2章では、間欠駆動により動力伝達を行うため、ばねおよび慣性（振動子）からなる振動部を導入することを提案した。

まず初めに単純構造（1つの回転軸と1つのクラッチ、および非回転部に固定された1つのばねから成る構造）を用いて、入出力軸の回転速度に差があった場合にも、振動部の導入により振動子が回転軸と同じ速度になる瞬間が発生することを示した。さらに、振動子が回転軸と同じ速度になった瞬間に係合（回転軸と振動子を固定）することで、摩擦による損失を発生させずにエネルギーを蓄積および放出（つまり動力伝達）できることを明らかにした。

その上で、単純構造で説明した原理に基づき、入出力軸間の動力伝達を実現する具体的な構造として、シンメトリックモデルとアシンメトリックモデルを提案し、それぞれの動作の説明および離散的な数値計算による動作のシミュレーション結果を示した。各モデルは以下の構造を持つ。

シンメトリックモデル

- ・ 2つの回転軸（入出力軸）
- ・ 2つのクラッチ（入力軸と振動子、出力軸と振動子を係合）
- ・ 非回転部と振動子に接続された1つのばね

アシンメトリックモデル

- ・ 2つの回転軸（入出力軸）
- ・ 1つのクラッチ（入力軸と振動子を係合）
- ・ 1つのブレーキ（非回転部と振動子を係合）
- ・ 出力軸と振動子に接続された1つのばね

各モデルのシミュレーション結果から、どちらの構造でもパルスドライブ動作が可能であり、提案原理により動力伝達（減速条件におけるトルク増幅）が可能であることを示した。最終的には、2つのモデルの減速条件でのエネルギーフローを比較することで、アシンメトリックモデルが優位性を持つ（ばねおよび係合装置に対する要求性能が小さくできる）ことを説明し、今後の検討はアシンメトリックモデルを対象に行うことを決定した。また、両方のモデルに共通する以下の概念をパルスドライブの定義としてまとめた。

- ・ 回転する軸間にばねに繋がれて振動する振動子（中間振動子）を持つ。
- ・ 係合装置が振動子とそれ以外の部品（回転軸もしくは非回転部）とを係合可能である。
- ・ 係合装置による係合は振動子と係合部品との速度が等しくなった瞬間になされる。

- ・係合中にばねエネルギーが充填，もしくは放出される．
- ・以上の構造及び動作により回転する軸間の動力伝達を行う．

第3章では，第2章で提案したアシンメトリックモデルに対して振動子の運動（ばね変位）を定式化した．パルスドライブの1サイクルを①自由振動，②クラッチによる蓄エネ，③自由振動，④ブレーキによる放エネの4つのフェーズに分け，それぞれの運動を自由振動および等速回転運動として定式化した．その結果，4つのフェーズすべてにおけるばね変位が計算可能となり，その計算例を示した．さらに，各サイクルで振動振幅が過渡的に変化（発散や消失）せず一定に保たれるための条件を導入し，これにより安定的な動作が可能となった．

最終的に，安定状態での伝達トルクを計算するための式を導出し，各パラメータの伝達トルクへの影響を検討した．また，連続的なパルスドライブ動作を実現するためのばね変位に関する制約条件や，ばねが破壊されないようにするための係合時間の制約条件を導き出した．

第4章では，試作機を用いた基礎的な実験評価による原理検証を行った．まず，試作機および評価装置の概要を示した後に，試作機が係合部を電磁クラッチとワンウェイクラッチを組み合わせた構成としていることを説明した．その上で，2種類のクラッチを併用している理由を説明するために，振動子の運動と各クラッチの係合を開始/終了するタイミングとの関係を明らかにした．

また，試作機のねじりばねの剛性，および振動子の振動周期を実験により計測した．さらに得られた特性を基に基本的な実験条件（固定の係合タイミングで行う実験条件）を決定し，実験により下記のことを確認した．

- ・異なる速度で回転する2軸間に振動子を配置した上で，想定されたタイミングでの間欠的な駆動による動力伝達の実現されていること．
- ・減速条件（入力軸回転速度 > 出力軸回転速度）における動力伝達により，平均伝達トルクが増幅されていること．
- ・間欠駆動のクラッチ係合時間が長くなると，平均伝達トルクとパワーが増加すること．
- ・伝達効率は80%前後であること．

また，得られた結果から，振動子の最高回転速度が想定した大きさよりも小さくなっていることを指摘し，振動子の最高回転速度が入力軸の回転速度に対して十分大きく保たれていないと，パルスドライブを安定的に動作させることができないことを説明した．そして振動子の最高回転速度を，第5章で構築するコントローラの制御対象として追加することとした．

第5章では、第3章で導出した式をベースに、トルクの制御や（安定動作のために必要な）振動子の最高回転速度の制御を実現するためのコントローラを構築した。まず初めに、コントローラを含めた装置の全体構成について述べ、その上で、コントローラに対する入力パラメータやコントローラが出力すべき値（信号）を明らかにした。そして、第3章で導出した式だけでは、それらの入出力に対応することができない（三角関数を含むため逆計算できない）ことを説明し、「トルク計算および補正部」および「係合タイミング計算部」を持ったフィードフォワードコントローラの構築方法を提案した。

次に、構築したフィードフォワードコントローラを用いた実験を行った。実験結果から、構築したコントローラによって試作機のパルスドライブ動作を実現可能であること、およびコントローラがトルクを誤差 1Nm 以内でかつ線形に制御する制御性を有していることを示した。一方で、構築したコントローラでの制御では、振動子の最高回転速度が目標値に対して大きな誤差を持ち、損失を考慮することによる補正が必要であることを説明した。

損失を考慮したフィードフォワードコントローラの構築のためにまず、電磁クラッチの損失評価実験を行い、クラッチの解放時に伝達トルクの 9.5% が失われることが明らかになった。よってその損失をフィードフォワードコントローラに適用するために、第3章で導出した式を拡張した。その結果、実験により、フィードフォワードコントローラの「振動子の最高回転速度の制御」の制御性が改善することが確認された。

また、より高性能な制御を実現するために、フィードバックコントローラの検討も行った。振動子の最高回転速度をフィードバックすることで、安定した制御が可能となることを示し、最終的に、構築した3つのコントローラを比較し、それぞれのメリットデメリットをまとめた。

一方で、トルク制御の応答性に関しては、（トルクの目標値を瞬間的に大きくする）ステップ応答試験により特性を評価し、パルスドライブの1サイクルの周期と同じ応答性でトルクが増加することが確認された。

第6章では、本論文の結論をまとめた。各章で得られた研究成果をまとめ、目的であった「間欠駆動（スイッチング）を用いた新しい変速原理の提案および原理検証」がなされたと結論付けた。一方で、今後の課題として①効率向上、②出力の増加、③振動の低減の3つの課題を挙げ、それぞれの課題についての対策の方向性を示した。

本論文では、新しい変速原理であるパルスドライブを提案し、メカニズムの定式化及び試作機による実験検証により、その実現性が確認された。本論文の成果によって、「間欠駆動（スイッチング）を用いた変速原理」という新しい変速原理が芽生え、小型高効率な変速原理の実現に向けて新たな可能性が拓かれた。