

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650050

研究課題名(和文) エネルギー蓄積型力覚提示機構

研究課題名(英文) Torque Conversion Mechanism for Energy-Accumulative Force Display

研究代表者

広田 光一 (Hirota, Koichi)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号：80273332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：機械的なスイッチング制御によるトルク変換機構を提案し、その実現の可能性を検証した。ERクラッチを用いて、フライホイールと入力軸との接続・切断を切り替えることにより、フライホイールへのエネルギーの伝達を制御する。この動作を高い周波数で行うことにより、実質的に連続的なトルク変換を実現する。この原理に基づくトルク変換機構の試作、数値シミュレーションによる動作の解析と効率に影響を与える要因の分析、スイッチング制御の改良による効率の改善などを通して、提案手法の基本的な可能性を確認した。

研究成果の概要(英文)：A novel torque conversion mechanism based on mechanical switching was proposed and feasibility of implementation was investigated. The mechanism is composed of ER clutches that connect and disconnect input axle from a flywheel. Energy flow through the mechanism is controlled by changing the temporal ratio of the connected and disconnected states. Substantially continuous torque conversion is possible by performing the switching operation at a high frequency. Prototypes of the conversion mechanism were developed, analysis of the motion of the mechanism by numerical simulation was performed, and improvement of the efficiency by modification of switching control were investigated. Through those experiments, fundamental knowledge of the mechanism was obtained.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ERクラッチ スイッチングレギュレータ トルク変換 トルク制御 力覚提示

1. 研究開始当初の背景

力覚インタラクションの多くにおいて操作の対象が受動的であり、エネルギーの供給がないことに着目した。その場合に対象がユーザに与える仕事は対象のもつポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーに基づくもののみである。物体を持ち上げるようなインタラクションについては明らかであるが、たとえば液体の入ったボトルを振るような場合においても、容器と内容物のもつエネルギーは、損失を除けば、人が仕事として与えるエネルギーの総和と等しくなる。このような状況を力覚提示装置により実現する場合、ユーザからの仕事をエネルギーとして蓄積・再利用する事ができれば、装置は原理的にはそれ以外のエネルギー供給を必要としない。

エネルギーを蓄積する方法は多様で、代表的には電気エネルギーに変換する方法があるが、トルクや角速度が大きく変化する状況で高い効率を得ることは難しく、特に速度 0 付近では著しく低下する。機械的実現方法としては、ゼンマイのようなエネルギー蓄積要素があり、無段トルク変換機構と組み合わせることで、任意のトルクにおいてエネルギーの蓄積と放出が可能になるが、既存の無段変速機構では、減速比の変化の範囲が狭く、機械的な操作が必要（電子的に制御するには駆動機構が必要）であるなどの問題がある。トルク変換機構の応用研究として、エネルギーを蓄積することにより、負荷の変動する機構の効率を向上させる試みがなされているが、この研究においても広範囲で動作する減速機構の実現については、十分な成果が得られていない。

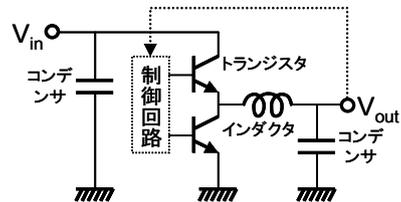
ER クラッチについては、これを制御に適用する理論的検討や、クラッチ特性のモデル化、力覚提示への応用などが試みられてきている。これらの研究の多くは、ER クラッチを可変ダンパ要素として利用するものであり、トルク変換という視点はなかった。

2. 研究の目的

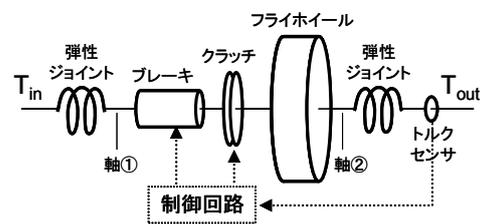
ユーザの力作用にとまなう仕事を機械的ポテンシャルエネルギーとして蓄積し再利用することのできる力覚提示デバイスについて、その基礎技術の確立を目指した。原理的にはユーザとエネルギー蓄積要素（ゼンマイなど）とを無段トルク変換機構で接続することで任意のトルク提示状態でエネルギーの授受が可能となる。しかしながら、これに適したトルク変換機構がなかった。本研究では、電気粘性流体（ER）クラッチのスイッチング制御による無段トルク変換機構を提案し、これを用いた力覚提示機構の実現の可能性を検証する。

電圧変換におけるスイッチング動作の考え方は電気回路においては広く活用されている。これが可能になった背景には on 抵抗が低く高速に動作するトランジスタの実用

化があったと考えられる。機械においても、近年、ER クラッチや MR クラッチのような高速に動作する「スイッチ」が開発されており、スイッチング動作に基づく機構の実現の可能性がでてきた。具体例として、図 1(a)に示す電圧変換回路に等価な機械系として図 1(b)の機構が考えられる。本研究は、この図に示すような機構の実現について検討するものである。



(a) スwitching制御の電気回路（電圧変換）



(b) スwitching制御の機構（トルク変換）

図 1 電圧変換とトルク変換

ER クラッチを、トルクを高速に断続できる機械要素として利用することで、連続的なトルク伝達を基本としてきた従来の手法とは異なる機構設計が可能になる。また、トルク変換機構は基本的な機械要素であり、機械エネルギーの制御に関係する領域に期待される。とくに直接的な電子制御が可能である点は従来の機構にはなかった利点となり得る。さらに、エネルギーの再利用により力覚提示デバイスの省電力化が期待される。可搬型の力覚提示装置が検討されるなかで、消費電力の課題について一つの解決の糸口を示すことができればと考えている。

3. 研究の方法

上述のように、トルク変換機構は、従来は連続的な接触による連続的なトルク伝達を基本としてきた。これに対して、本研究ではクラッチを用いたスイッチング動作による動作原理を提案する。機構は図 2(a)のように模式化することができる。以下では、軸 1 を入力軸、軸 0 を出力軸と呼ぶことにする。左のクラッチが On、右のクラッチが Off の状態 (On 状態、図 2(b)) では入力軸と出力軸とのトルクの差によりフライホイール I_0 が加速される、定常状態では入力トルクがそのまま出力に伝達される。逆の状態では、出力軸の負荷トルクによってフライホイールが減速され、出力トルクは 0 となる。この 2 つの状態を交互に切り替えることで、両者の中間的な伝達状態を作り出すことができる。

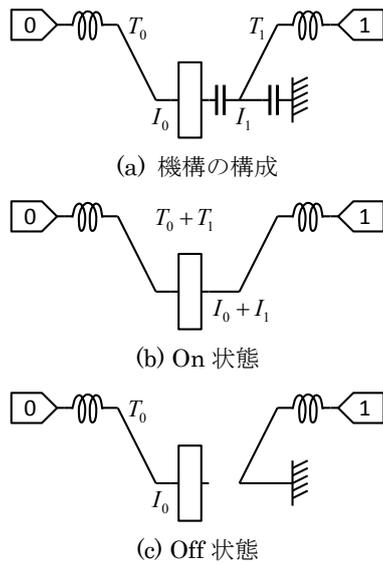


図 2 動作原理

本研究では、この動作原理に基づく機構を実装して、その実現の可能性について検討した。クラッチには、上述のように ER クラッチを利用した。クラッチの特性を計測し、機構の効率向上、エネルギー損失の発生要因の分析をおこない、また、数値シミュレーションにより、トルクや角速度などの仕様と、サイズや制御周波数などの設計パラメータとの関係について検討した。

4. 研究成果

(1) 機構の試作と評価 (プロトタイプ 1)

機構を試作し、その動作特性を評価した。最初のプロトタイプでは、効率の向上ではなく動作の確認とモデルの検証を目的とし、汎用の ER クラッチを用いた機構の構築を試みた。

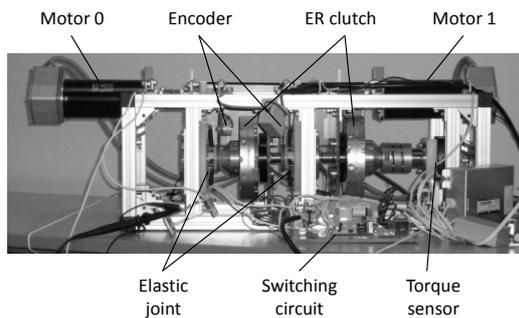
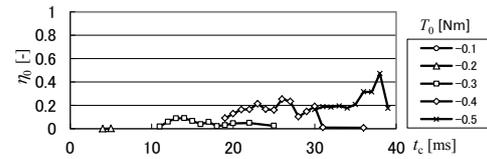


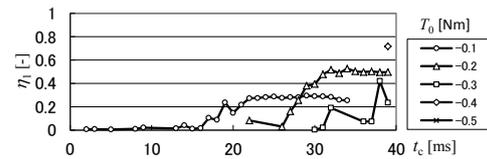
図 3 プロトタイプ 1

フライホイールおよび入出力軸の運動の計測、各部に作用するトルクの計測などにより、機構が上述の原理に従った動作を行っていることを確認した。また、機構のマクロな挙動としてトルク変換の特性や効率を評価した。この結果、On 状態と Off 状態の時間の比率を変化させることで、入力と出力のトルク比が変化すること、十分に高いとは言えないが計測可能な高率で動作することが確認された (図 4)。以上のことから、上述の

動作原理の妥当性が確認された。また、機構の動作の分析をもとに、エネルギー損失の発生要因とその大きさを定量的な検討を行った。



(a) 出力軸→入力軸



(b) 入力軸→出力軸

図 4 トルク変換効率 (実機)

(サイクル時間 40 ms、横軸は On 状態の時間)

(2) 動作特性の分析とシミュレーション

トルク変換効率の向上のために、機構を構成する要素のパラメータが動作効率に与える影響について、数値シミュレーションにより検討した。まず、ER クラッチの特性を計測しモデル化を行った。クラッチの機械的パラメータの中で、特にスイッチング動作に影響の大きい要素として、スイッチング時間、遅れ、摩擦トルクと速度特性、クラッチトルクの過渡特性などを調査し、これに基づいてクラッチのモデル化を行った。このクラッチのモデルと他の機械要素 (フライホイールや弾性ジョイント) のモデルを組み合わせることで、トルク変換機構の全体のモデルを構築し、動作のシミュレーションを行った。

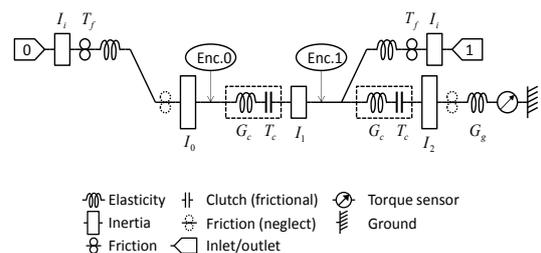
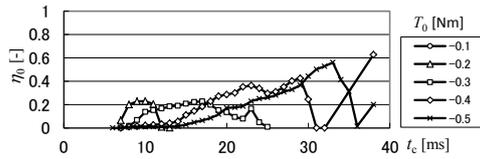
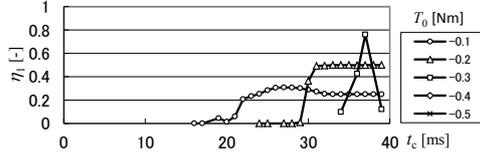


図 5 シミュレーションモデルの構成

シミュレーションにより得られた結果を、まず速度やトルクなどの時間変化について実機の動作と比較することで、モデルおよびシミュレーションの妥当性を確認した。これを踏まえて、トルク変換動作について実機との比較を行い、両者の結果が比較的よく一致していることを確認した (図 6 と図 4 の比較)。ただし、シミュレーションのほうが全般に効率が高い結果となっており、モデルに改善の余地があることも明らかとなった。



(a) 出力軸→入力軸



(b) 入力軸→出力軸

図6 トルク変換効率 (シミュレーション)
(サイクル時間 40 ms、横軸は On 状態の時間)

(3) 機構の改良と評価 (プロトタイプ 2)

機構の改良を試みた。プロトタイプ 1 の知見に基づいて、設計可能な範囲で適切と考えられるパラメータを選定し、機構を試作した。効率低下の一つの要因が、フライホイール以外の部分の可動要素のもつ慣性モーメントにあることが判明したため、ER クラッチも仕様にもとづく設計・製作をおこなった。この際に、2 つのクラッチ (クラッチとブレーキ) を一体化した構造を考案し実装した。プロトタイプ 1 と同様に、動作の特性の評価、シミュレーションとの相違に基づく動作の理解とモデルの精緻化、効率やエネルギー損失の評価を試みた。

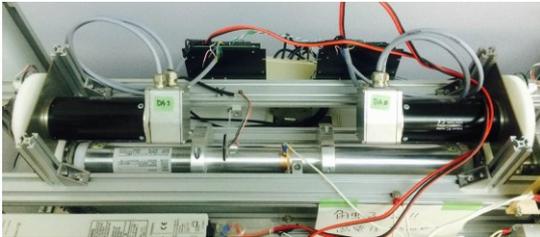


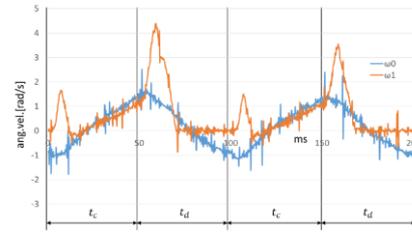
図7 プロトタイプ 2

(4) 制御手法の改良

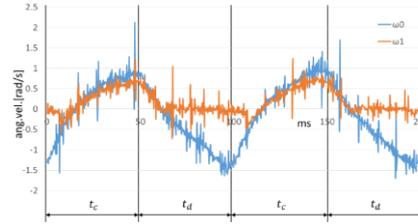
制御による効率の向上手法を検討した。クラッチに電圧を作用してからクラッチ力を生じるまでに無視できない遅れがあることが明らかになったことから、これを補償する予測的スイッチングを導入した。この遅延は、プロトタイプ 2 において特に顕著となったもので原因は特定できていない。遅延相当の時間だけ早めにクラッチに指令を出すことで、この影響を軽減でき、機構の動作が原理から期待されるものに近づくことを確認した (図 8)。

この他に、クラッチに蓄積される歪エネルギーの消失を抑える履歴依存の制御、ホイールの運動状態に基づいてスイッチングのタイミングを調整する手法、高減速比状態におけるスイッチング周波数の低減など、クラッ

チの特性の補償を中心として、エネルギーの不要な損失を抑える制御方法について検討したが、実装して検証するには至らなかった。



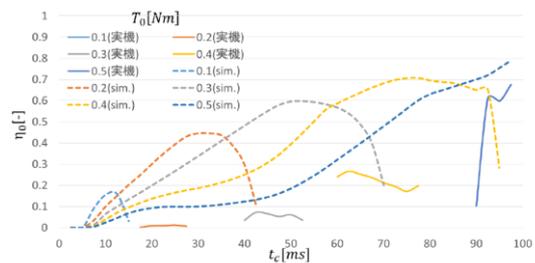
(a) 遅延制御なし



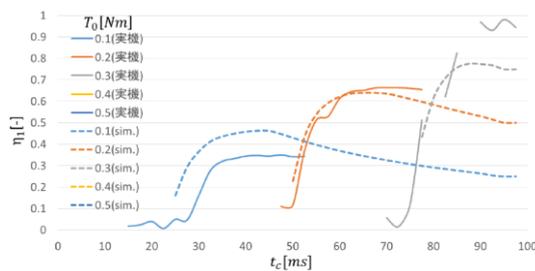
(b) 遅延制御あり

図8 クラッチの動作遅延を考慮した制御
(制御なしでは入力軸の速度が急峻に変化)

プロトタイプ 2 についても、トルク変換の特性と効率の評価を行った。また、実機による結果とシミュレーションとの比較を行った (図 9)。入力軸から出力軸へのトルク変換効率はプロトタイプ 1 に比べて改善がみられ、シミュレーションと実機の結果の一致も比較的良いが、逆方向については期待される効率が得られておらず、原因のさらなる検討が必要であると考えられる。



(a) 出力軸→入力軸



(b) 入力軸→出力軸

図9 トルク変換効率 (シミュレーション)
(サイクル時間 100 ms、横軸は On 状態の時間)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Koichi HIROTA, Yasushi IKEI: Switching Torque Converter: Concept and Preliminary Implementation; J. System Design and Dynamics, 6(4), 386-400, 2012(査読有)

〔学会発表〕(計1件)

桐山和也, 広田光一: ERクラッチを用いたトルクコンバータに関する研究; 日本 VR 学会 VR と超臨場感研究会, 2015. 1. 6, 首都大学東京日野キャンパス(東京都, 日野市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

広田 光一 (Koichi Hirota)

東京大学・情報学環・准教授

研究者番号: 80273332