ウォームギヤを用いたスードメカニクス構想と摩擦補償

Pseudo Mechanism Scheme and Friction Compensation of a Worm Gear Drive System

○正 岩本太郎 (龍谷大) 板井雄大 (龍谷大)
正(博士) 永野顕法 (龍谷大)

Taro IWAMOTO, Yudai ITAI, Akinori NAGANO
Ryukoku University, iwamoto@rins.ryukoku.ac.jp

We propose the Pseudo Mechanism scheme. Force feedback control enables back-drive of a worm gear, which naturally cannot be back-driven because of its mechanical stop feature. If the feedback control is switched on or off according to the conditions, its mechanical feature can be shifted from pseudo back-drivable characteristics to natural non-back-drivable characteristics. For example, if the force feedback control is applied only when the force is positive, this system allows the positive rotation and negative rotation is prohibited as a one-way clutch. The compensation method of friction loss of a worm gear is also tested.

Key Words: Worm Gear, Force Reflection, Friction Compensation

1. はじめに

ウォームギヤは一段で二桁程度の減速比が得られる回転伝達手段として良く使われるが、負荷側からモーターが逆駆動(バックドライブ)されない特性を持ち、このメカニカルストップ機能を生かした使われ方をする。逆に、モーター駆動を止めると直ちに停止し、緩停止により慣性力を吸収することができないため、用途が限られる問題があった。筆者らは負荷の回転力により発生するウォームの軸力を力センサで検出してポジティブフィードバックをかけ、ウォームの軸力が軽減される方向にモーターを駆動して、ウォームギヤが見かけ上逆駆動できるようにすることを提案した。この方法は、コンプライアンス特性が重要であるハプティックデバイスやマスタースレイブ・マニピュレータやバランスに適用することによって、その実現可能性実証してきた[1]-[4]。このシステムは逆駆動特性が制御で実現していることから、電源喪失事故などで制御不能になったときはウォームギヤ本来のメカニカルストップ機能が働くため、負荷による暴走事故を起こさない本質的安全性を備えている。

ところで、逆駆動特性は制御で実現しているということは、逆駆動特性を持たせるか持たせないかは意図的に決めることができることを意味する。すなわち、一方向だけに逆駆動特性を持たせるとすれば、このシステムはラチェットまたはワンウェイクラッチとして働く。また、負荷の回転力が設定値を超えたら逆駆動特性を持たせるように設定すれば、このシステムはトルクリミタとして機能する。このことは、このシステムのウォームギヤは擬似的に他の機構要素に取って代わることができることを意味している。しかも、これはこのシステムが働いているときはいつでもどの要素にでも切り替えができ、また方向やトルクの制限値をいつでも変えられることを意味する。そこで、この機能をスードメカニズム(擬似機構: Pseudo Mechanism)と称することにする。

このシステムではウォームの軸力を正しく検出することが重要であるが、ウォームの支持構造に摩擦力が大きく作用すると正しい負荷トルクを検出することができず、また歯面の摩擦力は微小な力の範囲で正確なパワーアシストを阻害する恐れがある。本論文では、スードメカニズムの提案と実証及び摩擦の低減策についての検討結果を報告する。

2. 動作原理

2.1 擬似的バックドライバビリティ

ウォームギヤは負荷の力では回転しないというのが一般的な認識である。逆駆動しないのは、ウォームにかかる回転力より摩擦力による抵抗のほうが大きいからである。もし、負荷の力を検出しモーターがこの摩擦抵抗を無くす方向にパワーアシストすると、ウォームホイールにかかる負荷トルクによりウォームが回転し、逆駆動が成立する。

図1と図2にこのシステムの基本構成を示す。外力トルクがウォームホイールにかかる時、ウォームには軸力が発生する。この軸力を片持ち梁にひずみゲージを貼った力センサで計測する。この計測値はサーボ系にポジティブフィードバックする。したがって、外力がかかった方向にモーターが駆動され摩擦抵抗が打ち消されてウォームが回転する。つまり、外力トルクはパワーアシストされ、本来は逆駆動されないウォームギヤの逆駆動が実現する。なお、図2に示す位置のフィードバックループは位置の復元特性を持たせるためのもので、逆駆動に関しては本質的には必要ない。

Fig.1 Conceptual figure of work gear drive with force sensor

Fig.2 Back drive control system of a worm gear unit

2.2 スードメカニズムの原理

上記の逆駆動システムにおいて、力フィードバックを働かせれば逆駆動が成立する。働かせなければ逆駆動はしない。したがって、制御を働かせるか働かせないかをスイッチングで選択できる。

図3に示すように、力センサのフィードバック信号ラインに閾値を差し引く要素と、信号の極性を判定する要素と、その結果でフィードバック情報の ON/OFF を切り替えるスイッチ要素を設ける。

まず、閾値を 0 にして力情報の極性を判定する。力が正のときにフィードバックループを ON にするようスイッチングを設定すると、外力トルクが正転方向のときは力フィードバック制御が働いてウォームホイールが正方向に回転する。しかし、外力トルクが逆転方向に働くと、力フィードバック制御が働かず、ウォームホイールは逆転方向には回転しない。これはラチェットまたはワンウェイクラッチと同じ動作である。

次に、閾値を設定すると、外力が閾値を超えた場合にスイッチが働いて力フィードバック制御が働き、逆駆動するようになる。つまり、これはトルクリミッタと同じ動作である。

さらに、スイッチを一定周期で ON/OFF すると摩擦抵抗を表現できる。PWM 制御と同様に、ON と OFF の時間の割合(デューティ)を変えることで摩擦抵抗の大きさを変えることができる。

Fig.3 Pseudo mechanism control of a worm gear unit

2.3 スードメカニズムの利点

スードメカニズムは力フィードバック制御と逆駆動しない機構の性質を利用して実現している。制御系の設定しだいでウォームギヤがいろいろな機構の性質を持つことになる。この設定は機構が動作中でも随時変更が可能であることに大きな特徴がある。

個々の機構の組み合わせで駆動系を構成すればシステムが大きくなる。あるいは、運転を停止して機構を取り替えなければならない。これを機構としてはウォームギヤ一つで実現でき、いつでも機構の特性を他のものに変更できる。また、トルクリミッタの許容トルクのように従来は機構の運転を止めて設定していたものを運転中でも随時変更できるように制御プログラムを作ることができ、リアルタイムでダイナミックな機構特性の操作が可能になる。

3. 実験の方法

3.1 ウォーム駆動機構の力検出構造の改良

前述したように、ウォームの軸力を正確に検出することがこのシステムでは大変重要である。図4に力検出機能を備えたウォーム駆動機構を示す。ウォーム軸は軸方向に少し移動できるように間隔をあけてラジアルベアリングで支えている。ウォーム軸の動きは平行梁に伝えられ、梁に貼り付けられたひずみゲージでウォームの軸力を検出する。モーターはベ-

スに固定されているので、ウォームの軸方向変位を許容しながら回転力を伝達しなければならない。このため、オルダム継ぎ手の角溝の隙間を利用して軸方向変位を許容している。

軸力を正確に計測するためには、軸力に応じてウォームが軸方向に自由に動かなければならない。図4の構造においては軸を支えるラジアルベアリングと回転軸との間、及びオルダム継ぎ手のスライド部に摩擦抵抗が発生する。これは力の正確な計測に悪影響を及ぼす。そこで、機構部を改良することにした。

図5に改良されたウォーム駆動機構を示す。ウォーム軸の支持ベアリングは廃止し、ウォーム軸は力検出を兼ねた平行梁のみで支える。このため、軸受けと軸が摺動するときの摩擦抵抗は全く無い。また、モーター軸とウォーム回転軸との接続にオルダム継ぎ手の代わりに図6に示すボールカップリングを使用した。これは鋼球を用いて軸方向の変位を許容し、回転トルクを伝達する機構要素である。これにより、ウォームの軸方向変位における摩擦抵抗をほぼ無くすることができ、正確な計測が可能になった。

Fig.4 Worm drive system with force sensors

Fig.5 Revised worm drive system with force sensors

Fig.6 Ball coupling

3.2 制御システム

制御システムは図7に示すように計算機を使い、ひずみゲージで検出した力の情報を A/D 変換を介して導入し、エンコーダで計測した位置の情報をデジタル信号として入力し、演算処理した指令値を D/A 変換を介してモータドライバに入力するシステムである。閾値の設定、信号の極性判別と制御モードの切り替え、偏差の計算等は C 言語を用いたプログ

ラムで処理した。なお、ひずみゲージを利用した力検出はノイズを拾いやすいため、デジタルフィルターをかけてノイズ除去処理をした。

Fig.7 Block diagram of the control system

3.3 摩擦補償

よく知られているように、ウォームギヤは摩擦抵抗があり、モーターでパワーアシストするとしても、摩擦抵抗がモーターのトルクによってキャンセルされるまでは動き出さない。つまり、わずかであるが不感帯が存在する。微小なトルクまで正確に表現するには、摩擦補償が必要である。そこで、二つの方法で摩擦補償を試みた。その一つは図8に示す、よく用いられるPID制御であり、もう一つは図9に示す摩擦の無い数学モデルを用いて誤差を補償するモデル追従サーボ制御である。

実験の結果、図10に示すように、モデル追従サーボ制御の場合は不感帯が減少しているが残留しているのに対し、PID制御の場合は不感帯がほとんど無く、良い結果が得られた。

Fig.8 PID control

Fig.9 Model follow servo control

Fig. 10 Experimental Result of friction compensation

4. スロッドメカニズム確認実験

4.1 ワンウェイクラッチ特性の模擬

ラチェットまたはワンウェイクラッチは負荷の方向、すなわち力検出値の極性によって回転を許容するか拒絶するかを決める。図11に示すように、外力が正方向の場合は外力によってウォームホイール軸は回転するが、負方向だと回転していない。なお、この実験では図2に示す位置のフィードバックをはずしていないので、元の位置に復元しているが、復元機能をはずせばその位置を保持する。図12は許容する回転方向を逆にした場合で、同じように外力が逆方向の場合のみ回転を許容していることがわかる。この回転を許容する方向の切り替えは、制御プログラム中の極性判定を行う部分の正と負を入れ替えるだけで行うことができる。

Fig.11 One-way clutch characteristics (Positive)

Fig.12 One-way clutch characteristics (Negative)

4.2 トルクリミタの模擬

トルクリミタは負荷アーム先端にかかる外力が制限値 300 g を超えると 5 度回転を許容するよう設定した。図13に示すように、外力トルクが許容値の 300 g を超えるたびに負荷軸が回転する様子が見て取れる。

Fig.13 Torque limiter characteristics

5. まとめ

負荷の力により逆駆動されないウォームギヤに力フィードバック制御をかけることで逆駆動ができる。この性質を利用し、条件により制御を ON/OFF することにより、ウォームギヤをワンウェイクラッチやトルクリミタとして機能させることができる。これをスードメカニズムすなわち擬似機構として提案し、実験によりその可能性を明らかにした。また、ウォームギヤの弱点である摩擦の補償方法を検討し、PID 制御により摩擦補償ができることをシミュレーションおよび実験により示した。

文 献

- [1] 渋谷恒司,竹内啓太,寺本智至,岩本太郎,"ウォームギヤを用いた 3 自由度ハプティックデバイスの開発",日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会,3G32,2002.
- [2] 岩本太郎,野阪常寛,渋谷恒司,"ウォームギヤを用いたハプティックデバイス駆動要素", Robomec2003, 1P1-2F-E5, 2003.
- [3] 外間達夫,岩本太郎,渋谷恒司,"ウォームギヤを用いたハプティックデバイス駆動要素の摩擦補償",第 21 回日本ロボット学会学術講演会, 3D13, 2003.
- [4] 板井雄大, 岡諭志, 小川真一, 岩本太郎, 渋谷恒司,"ウォームギヤを用いたマスタースレイブ・マニピュレータ", ROBOMECH2006, 1A1-C06, 2006