ウォームギヤを用いたスードメカニズム機能の実現

岩 本 太 郎* 板 井 雄 大* 白 山 幸 治* 永 野 顕 法*

Realization of Pseudo Mechanism Function Using a Worm Gear

Taro Iwamoto*, Yudai Itai*, Koji Shiroyama* and Akinori Nagano*

A conceptional idea of the pseudo mechanism is proposed. This concept means that a different mechanical feature from the natural one appears on the mechanism by means of control method. For example, a worm gear behaves like an one-way clutch. Generally, worm gears cannot be driven by load torque because of its mechanical stop feature. But the worm gear of this concept can be driven by load in specified direction, and the rotation to the other direction is prohibited. This asymmetrical motion is achieved by a switching operation of a force feedback control. The applied load torque is detected and fed back positively to a position servo control system in order to achieve power assist control. The worm gear seems to be driven by the load torque and it resembles to a spring motion. If the force feedback line is cut off, the drive system cannot be driven by a load. The switching operation of the force feedback line causes to a selection of back drivable feature or mechanical stop feature. The switching condition is set by a direction and threshold value according to the required mechanical feature. The pseudo mechanical worm gear also pretends as a torque limiter or a ratchet.

Key Words: Worm Gear, Force Feedback Control, Compliance Control, Mechanical Stop, Torque Limiter, One-way Clutch

1. は じ め に

ロボットではトルクを増大し回転速度を低減するためにモータの回転を減速して用いるのが一般的である。減速機構としては多段平歯車、ハーモニックドライブ、トロコイド減速機などがあるが、ウォームギヤは一般的ではない。その一因は、摩擦によりウォームギヤの機械的伝達効率が比較的低いことと、負荷側からモータが逆駆動されないメカニカルストップ機能があるため、過負荷に対して柔軟性がないためであると思われる。特にコンプライアンス特性を必要とするハプティックデバイスでは使用された例は見られない。しかし、ウォームギヤは一段で2桁の減速比が得られ、比較的安価であることから、問題点が解決できれば利用価値は高い。

ウォームギヤのロボットへの適用を明示した例は少ないが、以下のような例がある。浅間らは全方向移動ロボットの車輪駆動系に適用しており[1]、遠藤らは脚式歩行ロボット「ローラーウォーカー」の駆動系に用いている[2]。広瀬はウォームギヤをローラーウォーカーに用いた理由を負荷により逆転せず位置を固定できるからであるとしている[3]。これはウォームギヤのメ

カニカルストップ特性を積極的に利用する通常の使い方である。ハプティックデバイスには平歯車を用いることが多いが、永井はハーモニックドライブをハプティックデバイスに用いてコンプライアンスを実現したことを報告している[4]。ハーモニックドライブは逆転可能で高い減速比が得られる機械要素であるが、極めて高価でもある。また堀はテンションプーリーを用いてコンプライアンスを機構的に実現した柔軟指を開発している[5]。しかし、これらはウォームギヤは用いていない。また、外川らはばねによる力をウォームの軸方向変位を介して駆動ワイヤに加え、駆動プーリーとの摩擦力によりトルクを制限するトルクリミタを提示している[6]。ここでもウォームギヤの逆駆動できない特性は、トルクの制限値を維持するのに有効に作用している。

一方、西村はウォームギヤの動特性について報告している[7]。彼はウォームギヤの負荷による非線形運動伝達特性を明らかにすることが目的であった。しかし、この研究はウォームギヤの順方向駆動に関するものであり、逆駆動特性には触れていない。

ウォームギヤのコンプライアンスに関する研究は守谷により成されている[8][9]。この場合のコンプライアンスは機械的手段により行われた。すなわち、このシステムではウォームギヤ駆動系を支える板ばねの長さを変えることでインピーダンスを変化させている。この方法は確かにインピーダンスを変化させることは可能であるが、そのために新たに板ばねの長さ調整機構とアクチュエータを必要とし、駆動系を複雑にする可能性が

原稿受付 2009年2月18日

*龍谷大学

*Ryukoku University

■本論文は学術性で評価されました。

高い。

これに対し、筆者らは負荷トルクの情報を正帰還して負荷をパワーアシストする方法でウォームギヤにコンプライアンス特性を持たせる研究を進めてきた。その結果、コンプライアンス特性が極めて重要なハプティックデバイス（3軸）をウォームギヤを用いて実現することに成功した[10]。その後、摩擦補償の研究を行う[11][12]とともに、マスタスレーブ・マニピュレータ[13]やバランサーも実現してきた。なお、筆者らの報告[10]のあとになるが、吉野らは渦電流式ギャップセンサを用いて検出した力をフィードバックしてバックドライブを可能にできることを報告している[14]。

ところで、筆者らのこの方式では、コンプライアンス特性は力フィードバック制御に依存していることから、電源喪失事故のような場合にはコンプライアンス特性が消滅し、元のメカニカルストップ特性に戻るため、その現在位置を維持するように働く。このため、産業用ロボットでは必須とされている安全ブレーキ機能をウォーム減速機のメカニカルストップ機能で充足することができ、本質安全性が備わっている。

この機能を積極的に利用するため、力のフィードバックラインにスイッチ機能を設け、このON/OFF操作によって開ループ制御と閉ループ制御を任意に切り替えることで、擬似的な機械特性と本質的な機械特性の両方を利用することを考えた。すなわち、負荷トルクが特定の方向のときだけ正帰還サーボ制御をONにすれば、ウォームギヤにワンウェイクラッチの特性を持たせることができ、また負荷トルクが設定値を超えたらONにすることでトルクリミターの特性とすることができる。このように、ウォームギヤに本来の機械特性と異なる機械要素の特性を持たせることに成功した。このため、これを新しい概念であるスードメカニズム（疑似機構）として提案した[15][16]。

本論文では、力フィードバックによるウォームギヤの逆駆動およびコンプライアンス特性の実現と、その手法を応用したスードメカニズムの原理と利点について論じる。

2. 動作原理

2.1 ウォームギヤの機械的特性

ウォームギヤはFig. 1に示す構造をしており、ねじ状のウォー

Fig. 1 Worm gear

ムを回転することでギヤ状のウォームホイールを駆動する。ウォームが一条であれば、ウォームの一回転でウォームホイールの一歯が送られるので、ウォームホイールの歯数に等しい比較的高い減速比が得られる。

よく知られているように、ウォームの歯はウォームホイールの歯とすべり接触するので摩擦抵抗があり、減速比が大きい場合はウォームの進み角が摩擦角より小さくなる関係でウォームホイールからウォームを駆動することは一般にできない。これがメカニカルストップ特性である。

2.2 コンプライアンス特性の表現

ところで、Fig. 2に示すように、ウォームホイールにかかる負荷トルクはウォームに対する軸力として作用する。この軸力によって駆動ユニットのハウジングが回転しようとするのを板ばねによって止めると、板ばねに曲げひずみが発生する。これをひずみゲージで検出すれば、負荷トルクに対応した力センサ出力が得られる。この検出値をサーボ系に正帰還すれば、以下に述べるようにウォームギヤの負荷による逆駆動が可能になる。

Fig. 3に示すように、 K , k_f , k_a をゲインとし、ウォームギヤWGにある力センサFSの検出値を正帰還として制御系を組むと、負荷を減らす方向にモータMが動作するパワーアシスト型サーボ制御が実現できる。ほかに位置センサPを用いて位置サーボ系を構成し、その負荷軸を元の位置に戻そうとする特性とパワーアシストによる負荷追従特性の合成でコンプライアンスの制御が可能になる。この動作は機械的に見れば、ばねの性質を表している。

このことを実証するため、Fig. 4に示す3軸ハプティックデバイスを試作した。ハプティックデバイスはアーム先端に作用する力でアームが押し戻されながら反力を負荷に返し、仮想物体の柔らかさを表現するものである。負荷の力でアームが逆に動かされることが必要なので、従来はウォーム駆動が適用できない用途である。この装置に適用した駆動機構をFig. 5に示す。モータとウォームとそれを支える構造材からなる駆動ユニットは駆動軸周りにユニットごと回転でき、板ばねを介して駆動ユ

Fig. 2 Worm gear and a load torque sensing mechanism

Fig. 3 Position and force feedback control system

Fig. 4 Haptic device

Fig. 5 Drive mechanism

Fig. 6 Compliance characteristic

ニットをバランサ全体を支え静止系である支持フレームの一部に対し固定することで回転を止めている。負荷トルクにより発生する板ばねのひずみをひずみゲージにより検出し、力に換算することで負荷トルクを検出している。Fig. 6に位置の目標値を固定し、負荷トルクを加えたときの実験結果を示す。負荷トルクはアームに重錘をかけることで与えた。前腕、上腕、旋回各軸でコンプライアンスを表現することができている。

ところで、Fig. 3に示す位置情報のフィードバックは負荷軸の位置を元に戻す作用をするのでコンプライアンス特性に寄与するが、負荷トルクによる逆駆動の可否には直接は関係なく、このフィードバックラインは除去しても逆駆動そのものは可能である。このことを確認するために、Fig. 7に示すバランサを作成した。

Fig. 7 Balancer

Fig. 8 Measured force and motor voltage

Fig. 9 Control system of balancer

バランサはハンドリングする荷物の重量をアームの力でバランスしながら、アーム先端に作用する操作力により荷物の位置を任意に移動させる荷役装置である。バランサの場合はFig. 3に示す位置フィードバックは除き、アーム先端に加える力に追従して動作し、その場所に留まるように設定した。先端の荷物に対する重力保障については、三角関数特性を持つ非線形ポテンシオメータを用いて力の垂直成分を求め、アナログ処理した。

荷物の重量はアームの駆動トルクで補償され、アームは先端に作用するハンドリング力によって前後、左右、上下に自由に動かなければならない。Fig. 8は錘を用いて水平のアームに加えた負荷トルクに対し、力センサの出力電圧およびモータにかかる電圧の変化を示すものである。ただし、アーム先端に吊荷となる荷重は乗せていない。Fig. 8より負荷トルクに比例したモータ出力になっていることが分かる。

バランサの制御系をFig. 9に示す。アーム角度センサは重力保障のための非線形ポテンシオメータを用いた。アーム位置のフィードバックは除かれ、可変ゲイン k_p を荷重のアジャスタと

する重力バランスのフィードバックラインが付加されている。

実験の結果、ハプティックデバイスもバランスもアーム先端を手でつかんで加えた動きに追従し、ウォームギヤだけでは動くはずのないアームが制御により逆駆動されることを確認した。また、力センサの電源を切り、フィードバックをなくせばメカニカルストップ機能が作用して負荷の大きさによらずその場で停止し、力を加えても動かずその状態を維持することが確かめられた。つまり、本質安全性を有することが示された。

2.3 スードメカニズムの原理

上記のことから、力フィードバックの ON/OFF 操作により機構本来の性質と制御により作られる擬似的性質を切り替えられることが明らかになった。そこで、Fig. 3 をベースに Fig. 10 に示すような力フィードバック制御系を構成した。検出した力フィードバック情報から閾値を差し引いた値の極性を判別してフィードバックラインのスイッチを ON/OFF するところに特徴がある。また、位置のフィードバックラインについても必要に応じて位置サーボの有無を選択できるようにスイッチを設けた。なお当然のことながら、このために制御系を計算機を含むデジタル方式に変更し、フィードバック情報の処理はソフトウェアで処理している。

閾値を 0 とした場合、例えば力が正の場合にスイッチを閉じ、負の場合にスイッチを開くとすると、負荷の力が正の方向には回転するが、逆方向には回転しない。これはワンウェイクラッチやラチェットと同じ動作である。極性の判別によるスイッチの ON/OFF 操作を逆にすれば、回転を許容する方向が反転する。これはプログラム上では極性の反転で処理できるが、同じ機能を機械的に実現しようとするれば、許容回転方向の異なる二つのワンウェイクラッチを設け、クラッチで切り替えるなど複雑な構造になる。

閾値を設定した場合は、負荷トルクがある値を超えたら回転を許容するようにできる。これはトルクリミタの動作である。閾値の大きさや極性はプログラムで任意に設定や変更が可能である。つまり、機構に触れることなく許容トルク値や回転許容方向を随時変えることができる。トルクリミタの許容トルクは通常は機構内部のばね力の強さで設定されており、これを変えるにはいったん回転を停止してばね力の設定変更を行わなければならない。

以上のように、これらの ON/OFF 切り替えを行うときの信号の極性や閾値の設定は Fig. 10 の制御系を計算機制御系とすれば、プログラムで簡単に変更できることである。

Fig. 10 Pseudo mechanism control system

3. 実 証 実 験

3.1 実験装置

Fig. 11 はスードメカニズムの機能を実証するために用いられたウォーム駆動機構である。Fig. 12 にその駆動系の構成を示す。ウォームの軸方向力を板ばねで作られた平行梁で支え、その変位をひずみゲージで検出して力検出を行う。制御系はデスクトップパソコンに A/D, D/A 変換インタフェースを装備したものをを用いた。

なお、この実験では位置サーボは必要ないので、位置フィードバックラインのスイッチを OFF としている。

3.2 機能模擬実験結果

(1) ワンウェイクラッチの機能模擬

ワンウェイクラッチまたはラチェットは一方のみ回転を許容する機構である。これを模擬する場合は、負荷トルクの極性で力フィードバックラインの ON/OFF を判定する。Fig. 13 はアームにかかる負荷トルクとアームの角変位を示すグラフである。灰色の枠は入力を反映してアームが動作している範囲を示

Fig. 11 Apparatus for pseudo mechanism experiment

Fig. 12 Drive structure and force sensor

Fig. 13 Pseudo one-way clutch(CW)

Fig. 14 Pseudo one-way clutch (CCW)

Fig. 16 Pseudo one-way clutch (CW)

Fig. 15 Pseudo torque limiter

Fig. 17 Pseudo one-way clutch (CCW)

す。負荷トルクが正の場合、その期間は角変位が発生している。負荷トルクが負の場合は角変位は発生しない。したがって、一方向のみ回転している。Fig. 14 は極性を反転した場合である。負荷トルクにしたがって負の方向のみ回転している。

(2) トルクリミタの機能模擬

Fig. 15 はトルクリミタを模擬した実験である。検出した力が図中に示す閾値のラインを超えると回転を許容する。逆方向にも同様に負の閾値を超えると回転を許容する。すなわち、どちらの回転方向についても負荷力が許容値を超えたら回転を許容する両極性である。

4. スードメカニズムの特徴

4.1 スードメカニズムの利点

スードメカニズムは、機構本来の持つ性質と制御で作り出された擬似的性質を条件により切り替えることで成立する。ウォームを用いる場合はウォームの持つメカニカルストップ機能と力サーボによる逆駆動特性をある条件のもとで切り替え、別の機構の機能を実現する。この制御による擬似的性質は力フィードバックラインのスイッチ操作で行われるが、これを計算機制御系として構成すれば、その条件設定はプログラム次第でどのようにでも設定できる。このことは次の利点を生む。

- ①減速機構が他の機構の役割も合わせ持つので、機構要素が減り、構造がシンプルになる。
- ②一つの機構で複数の機構の代替ができる。
- ③動作中でも、いつでも瞬時に機械特性を切り替えられる。
- ④極性（許容回転方向）や閾値の設定が自由に変えられる。
- ⑤本質的安全性を持つ。

Fig. 18 Pseudo torque limiter

4.2 スードメカニズムの発展性

スードメカニズムは既存の機構を模擬するだけでなく、その変形も模擬が可能である。例えば、Fig. 10 において下側にある位置のフィードバックのスイッチを ON にすると、位置の復元特性が付加される。これをワンウェイクラッチ／ラチェット動作に加えると、Fig. 16 に示すように、負荷トルクに応じて一方向には回転を許容するが、トルクを減じれば元の位置に復帰する。また、逆方向には回転しない。これは回転方向を一方に制限したばね機構と考えられる。Fig. 17 は極性を逆にしたものである。

Fig. 18 は負荷トルクが許容値を超えた場合に一定角度回転するように設定したものである。逆方向にも同様に負の許容値を超えると回転を許容する。すなわち、どちらの回転方向についても負荷トルクが許容値を超えたら一定角度回転を許容する両極性である。

5. ま と め

本来逆駆動ができない機械的性質を有するウォームギヤに力フィードバックによるパワーアシスト制御を組み合わせることによって逆駆動を可能にし、コンプライアンス特性を持たせることができた。さらに、この系の力フィードバック制御を条件に応じて ON/OFF できるようにすることで、ばね、ワンウェイクラッチ、トルクリミタの機構要素の性質を模擬できることを示した。この概念を、機構が有する本来の性質と異なる特性を模擬できるという意味でスードメカニズム（疑似機構）と称する。

スードメカニズムは上記のほか、さらに他の機構を模擬できる可能性がある。例えば、モータの PWM 制御のように力フィードバック制御の ON/OFF を周期的に切り替え、周期中の ON の時間をデューティーとして制御することにより、ブレーキ力の調整ができると考えられる。また、ワンウェイクラッチと極性の切り替えを組み合わせると、振動を利用した間欠駆動系として利用できると考えられる。例えば常時振動を発生している環境の中に置き、特定の方向の振動のみを推進力にして回転するなどが考えられる。

なお、衝撃的な強い負荷がかかったときは、ウォームギヤがロックする恐れが懸念される。これはウォームギヤの支持構造やギヤの材質など機構設計に強く依存し、実用上の課題として存在すると思われる。

謝 辞 本研究には多くの学生が装置の製作と実験に関し貢献した。特に、ハプティックデバイスの開発に寄与した寺本智至、竹内啓太両氏とバランスを開発した門裕一氏に感謝する。

参 考 文 献

- [1] 浅間一，佐藤雅俊，嘉悦早人，尾崎功一，松元明弘，遠藤勲：“3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，

vol.14, no.2, pp.249-254, 1996.

- [2] 遠藤玄，広瀬茂男：“ローラーウォーカーに関する研究—システムの構成と基本的動作実験—”，日本ロボット学会誌，vol.18, no.2, pp.270-277, 2000.
- [3] 広瀬茂男：“「可変拘束機構」とその設計—特殊環境移動作業ロボットへの適用—”，日本ロボット学会誌，vol.17, no.5, pp.615-619, 1999.
- [4] 永井清，益原絆，山中和也：“ハーモニックドライブを有するマニピュレータに対する飽和特性とディザを用いた力センサレス・コンプライアンス制御”，日本ロボット学会誌，vol.22, no.3, pp.353-360, 2004.
- [5] 堀滋樹，柏木信人，西原主計：“可動テンションブリーを組み込んだ柔軟指関節”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.6, pp.864-867, 1997.
- [6] 外川圭司，遠藤玄他，広瀬茂男：“3 次元空間移動型索状能動体 ACM-R2 の開発”，Robomec '99, 1P2-31-026, 1999.
- [7] 西村国俊，中川三男，川崎晴久：“ウォームギヤ減速機構の動特性”，精密機械，vol.51, no.8, pp.49-55, 1985.
- [8] 森田寿郎，鈴木雄一郎，川崎毅彦，菅野重樹：“人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御”，日本ロボット学会誌，vol.16, no.1, pp.102-109, 1998.
- [9] 森田寿郎，菅野重樹：“メカニカルインピーダンス調節機構による関節制御”，日本ロボット学会誌，vol.14, no.1, pp.131-136, 1996.
- [10] 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予稿集 CD-ROM, 3G32, 2002.
- [11] 岩本太郎，野坂常寛，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”，Robomec 2003, 1P1-2F-E5, 2003.
- [12] 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予稿集 CD-ROM, 3D13, 2003.
- [13] 板井雄大，岡論志，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”，Robomec 2006, 1A1-C06, 2006.
- [14] 吉野龍太郎，宮川正好：“ウォームギヤを用いた指関節トルクセンサの開発”，第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3J26, 2004.
- [15] 岩本太郎，板井雄大，永野顕法：“ウォームギヤを用いたスードメカニズム構想と摩擦補償”，Robomec 2008, 1A1-B17, 2008.
- [16] 岩本太郎，板井雄大，渋谷恒司，永野顕法：“スードメカニズムとその可能性”，第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3E1-03, 2008.

岩本太郎 (Taro Iwamoto)

1972 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年株式会社日立製作所に入社。1996 年龍谷大学理工学部教授。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)

板井雄大 (Yudai Itai)

2008 年龍谷大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。同年，株式会社日立建機に入社。現在に至る。

白山幸治 (Koji Shiroyama)

2008 年龍谷大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻修士課程入学。在学中。

永野顕法 (Akinori Nagano)

2007 年龍谷大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。同年博士後期課程に進学し
(日本ロボット学会正会員)