

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19560245  
 研究課題名 (和文) プレス機械フィード軸高速化用ツインドライブ式歯車装置系の省エネルギー振動抑制制御  
 研究課題名 (英文) Energy-saving vibration suppression control of the twin-drive geared system for speeding up the feeding axis of the presswork machine  
 研究代表者  
 伊藤 昌彦 (ITO MASAHIKO)  
 仙台高等専門学校・機械システム工学科・教授  
 研究者番号：00342452

研究成果の概要 (和文)：プレス機械フィード軸における高速化運転を実現するため、サーボモータ 2 台を歯車段で連結したツインドライブ式歯車装置で駆動する場合を取り上げ、実運転時の省エネルギー化が可能となる振動抑制制御手法の開発を行った。省エネルギー振動抑制制御手法として、モデルベース制御手法の適用効果を検証した。プレス機械フィード軸を模擬するテストスタンドで、バックラッシュに起因する高次振動の抑制と約 26Hz の残留振動の整定時間を約 1/3 に低減できることを確認した。

研究成果の概要 (英文)：In this study, a twin-drive geared system which connected two servomotors with a gear train to realize speeding-up operation at the feeding axis of the presswork machine was taken up and a vibration suppression control for energy-saving in operation was developed. As an energy-saving vibration suppression control technique, a model-based control was developed. The effectiveness of the model-based control is verified by using the test stand which imitates the feeding axis of the presswork machine. The higher-order vibration related to the backlash was suppressed. Further, the settling time of the residual vibration of 26Hz was shortened down to about 1/3 of the uncompensated vibration level.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御、ツインドライブ、歯車装置、フィード軸、省エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 研究の学術的背景

プレス機械のフィード軸においては、被駆動機械系を駆動するのに必要なパワーの条件を満たすようにモータを選定すると、容積

や重量の点で大型になる場合が多い。大型のモータを設置する空間が十分にとれない場合には、歯車段を介して同出力の小型のモータ複数台を被駆動機械系に結合し、パワーを合成できるように駆動系を構成するのが一

般的である。しかしながら、被駆動機械系の組立精度が低い場合や制御系も含めた各々のモータの動特性が同一でない場合があることから、各モータが分担するトルクは必ずしも均等ではない。さらに、歯車段にはバックラッシュが存在するので、モータの出力トルクの不均等分担の状況は悪化してしまう。このため各モータが回転中に互いに干渉し合い、パワーをロスすることで歯車の損傷や、被駆動機械系の運動と要求精度を満足できないという問題が生じる。

そこで、駆動系の有する動的挙動の不均一性と被駆動機械系の構造自体に起因する振動現象との関わり合いを明らかにするとともに、この問題を解決するための簡便で実運転時の省エネルギー化が可能となる制御手法の開発が必要となる。

(2)本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ

減速機を有する機械システムで発生する過渡振動の抑制手法としては、従来からセンサやオブザーバを用いて状態フィードバックを行う方法が多く提案されている。

しかしながら、付加のセンサを用いる手法は、コストアップを伴う問題がある。また、外乱オブザーバをベースとしてギヤトルクをPDフィードバックする手法が提案されているが、現場でのパラメータ調整に難点がある。さらに、ひとつの歯車対を取り上げ、リアプノフの安定理論と状態フィードバックによる振動抑制手法も提案されているが、歯車対と機械システムとの関わりを考慮した制御手法とはいえない。これらの手法は、モータ1台で被駆動機械系を駆動する事例がほとんどである。

従来油圧式であった一般産業機械の電動化が進む中で、複数のモータで駆動される機械系の制御は、モータの同期が取れていれば何も問題が生じないと考えられてきており、歯車対における干渉問題は実際に駆動系を構築した段階で初めて直面する問題で、ほとんど取り上げられていなかった。

ツインドライブ式の動力伝達機構と制御に関する文献は少ないが、近年ロボットの応用分野が広がり、医療技術の分野への適用例として、内視鏡手術用のバイラテラルロボットにツインドライブシステムの導入が試みられている。その例として、バイラテラルロボットの振動抑制と力制御による位置応答と力応答の向上を目的として、共振要素を含むツインドライブシステムのモデル化と制御手法が提案されている。この制御手法は、ギヤを用いた差動機構に起因するねじり振動を、反力推定オブザーバを用いた状態フィードバックにより抑制するものである。その制御性能は、モデル化誤差に依存すると考えるが、言及されていない。本研究では、ギヤ

を用いた動力合成系としてのツインドライブシステムを取り上げ、構成が簡便な速度制御ループに関するモデルベース制御手法を適用する。

以上のように本研究は、電気制御系の不均一性および機械系の構造に起因して発生する非線形な動的挙動の把握と、その現象に対する簡便で省エネルギー化が実現できる制御手法の開発を行うことを目的としており、この開発に成功すれば、動力合成系の機構と制御系の設計に広く利用できる他に例を見ない独創的な技術と位置づけられる。

## 2. 研究の目的

本研究ではツインドライブ式歯車装置を取り上げ、機械系の固有振動数がモータのバンド幅内に存在し、起動・停止時に発生する残留振動が原因で、システムのタクトタイムの短縮と高精度化ができない問題について、残留振動の抑制と省エネルギー化のための制御手法の開発研究を、以下の(1)~(3)に示すように実施する。本研究で得られる手法は、簡便な構成で省エネルギー化が可能となり、現場での調整も容易な構成であることから、産業界の技術発展に貢献できるという社会的意義があると考えられる。

(1)システム内の各構成要素の不均一性と動的挙動との関係の定量的把握

2台の「モータおよび制御装置」について、同一制御パラメータの条件で存在する動特性の不均一性を定量的に明らかにする。そして、平歯車を用いてモータ2台を結合させてトルク合成系を構成し、同一制御パラメータの条件で存在する動特性の不均一性について、組立精度およびバックラッシュ量との関わりにおいて定量的に明らかにする。さらに、実機を模擬する機械系として、第1次の固有振動数がモータの制御周波数帯域内に存在するシステムを構成し、負荷で発生する残留振動と駆動系の動特性の不均一性およびバックラッシュ量との関わりを定量的に明らかにする。

(2)残留振動抑制のための制御手法の開発

制御手法としては、機械系および電気制御系から成る低次元制御モデルを用いるモデルベース制御手法を適用する。システムの構成要素の不均一性と動的挙動の関係を基にした制御モデルの構成方法と本手法の適用効果を明らかにする。省エネ効果の検証は、モータに流れる電流を評価することで行い、開発する手法の有効性を明らかにする。

(3)負荷実験による検証

実機の負荷状況を模擬する実験を行い、制御手法の有効性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

図1に研究対象であるツインドライブ式歯

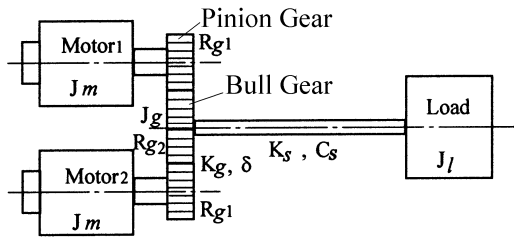


図1 Schematic diagram of a twin-drive geared system

車装置系の概略を示す。被駆動側歯車にねじりばね要素を介して負荷慣性体が取付けられ、同出力のサーボモータ2台で駆動される構成である。

本研究の実施内容は、(1)「各構成要素の不均一性と動的挙動の定量的把握」、(2)「振動抑制制御手法の検討」、および(3)「振動抑制制御の実験評価」から成る。

#### (1) 各構成要素の不均一性と動的挙動の定量的把握

ツインドライブ式歯車装置系において発生する干渉の問題について、歯車の取付偏芯量と電流アンバランスとの関係を定量的に把握する。組立誤差の影響については、誤差のモデル化を完成させ、シミュレーションにより誤差の負荷で発生する残留振動および回転むらに及ぼす影響を定量的に把握する。

#### (2) 振動抑制制御手法の検討

まず、速度制御ループに関するモデルベースト振動抑制制御手法の有効性を明らかにする。さらに、このモデルベースト制御手法と異なる振動抑制手法を提案し、有効性を検証する。

#### (3) 振動抑制制御の実験評価

①「残留振動の抑制実験」を行い、モータの電機子電流を実測する。本研究の振動抑制制御手法を用いることで、モータの電機子電流が低減され、省エネ化の達成を検証する。

②「外乱抑制効果の評価実験」では、外乱により負荷で発生する残留振動に対しモデルベースト制御を適用し、振動の抑制効果を検証する。

### 4. 研究成果

本研究の成果を、以下に示す。

#### (1) 各構成要素の不均一性と動的挙動の定量的把握

「各構成要素の不均一性と動的挙動の定量的把握」では、まず2台の「モータ・制御装置」系において、無負荷の状態での動特性として周波数特性、騒音レベル、振動レベルを定量的に把握した結果、不均一性はほとんど見られなかった。この2台の「モータ・制御装置」を用いて構成したツインドライブ式歯車装置系において発生する干渉の問題につ

いては、歯車の偏芯取付けの影響と考えられる電流値のアンバランスが生じているが、偏芯量と電流アンバランスとの関係は定量的に把握するまでは至らなかった。組立誤差の影響については、誤差のモデル化の段階に留まり、シミュレーションによる誤差の負荷で発生する残留振動および回転むらに及ぼす影響を定量的に把握するまでは至らなかった。

#### (2) 振動抑制制御手法の検討

①「ツインドライブ式歯車装置系の振動抑制制御手法」として、速度制御ループに関する低次元モデルを動的補償器として用いて負荷の残留振動を抑制するモデルベースト制御手法を提案し、その有効性をシミュレーション検証した。

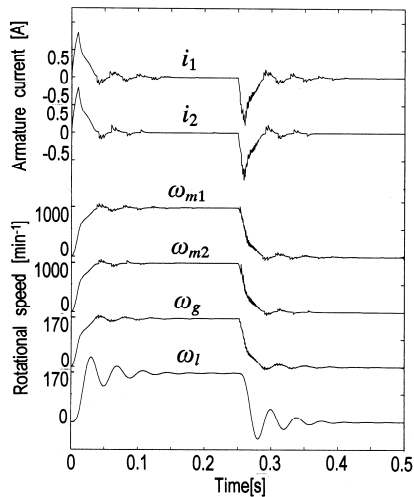
動的補償器としての低次元制御モデルの固有振動数に±10%程度の誤差が存在しても、負荷で生じる約26Hzの残留振動の整定時間およびオーバーシュートを約1/2に低減でき、バックラッシュと関わる高次の振動も低減できている。また、駆動制御系の不均一性として2台のモータのトルク定数に、±3%程度の誤差が存在しても、モデルベースト制御手法の適用により残留振動の整定時間およびオーバーシュートを約1/2に低減できることを確認できている。

②トルク分担補償型モデルベースト制御を位置制御ループに組込むことの有効性をシミュレーションし、残留振動( $\omega_l$ )の整定時間を約1/3に低減できることと、モータの駆動電流( $i_1, i_2$ )を約24%低減できることを検証している。この結果を、図2に示す。図中の $K_g$ は、モデルベースト制御のゲインを示す。

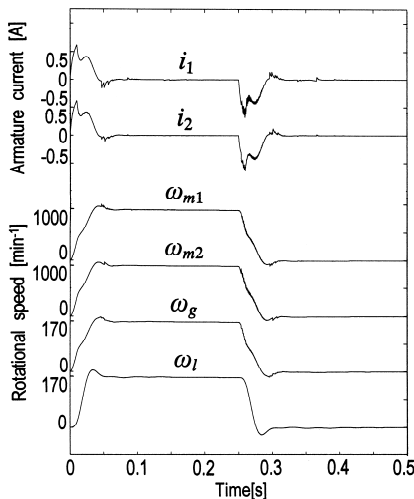
③外乱抑制制御のシミュレーションにより、負荷慣性体にモータの定格トルクの10%が外乱としてステップ状に作用する場合について、26Hzの残留振動の整定時間を約1/2に低減できる効果を確認した。さらに、「速度制御ループに関する低次元制御モデル」を用いたモデルベースト制御系を位置制御ループに組込み、バックラッシュ量をJISに基づく最小値0.085mmに設定して振動抑制実験を行った結果、残留振動の整定時間を約1/2に低減できる効果を確認した。

#### (3) 振動抑制制御の実験評価

①ツインドライブ式歯車装置系のテストスタンドを構成し、モデルベースト制御手法のアルゴリズムを搭載して実験を行った結果、残留振動の整定時間を約1/2に低減できることを確認した。さらに、2台のサーボモータが分担する駆動トルクを均等化するための局所補償ループを電流制御ループに備えたトルク分担補償型モデルベースト制御の適用により、バックラッシュに起因する高次振動の抑制と低次の残留振動の整定時間を約1/3に低減できている。この結果を、図3に示す。



(a) Without model-based control ( $K_b = 0.0$ )

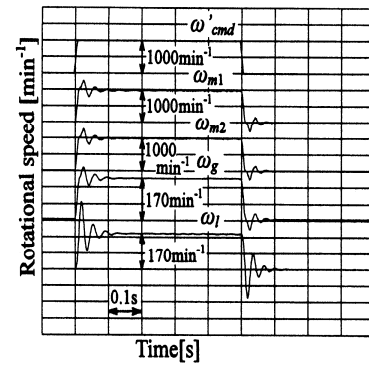


(b) With model-based control ( $K_b = 0.6$ )

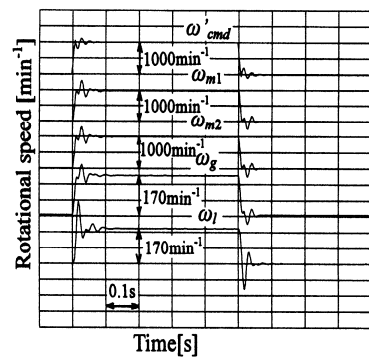
図2 Simulation results (Without the position control loop)

② ツインドライブ式歯車装置系に応用するため、まずシングルドライブ式歯車装置系に適用するための振動抑制手法の開発を試みた。これは、被駆動側歯車に取り付けた速度センサの信号を、被駆動側歯車を含む駆動側機械系の回転速度と被駆動側機械系の回転速度との関係を表す伝達関数に作用させ、被駆動側機械系の回転速度を推定し、振動抑制のための補償信号として用いる手法である。ステップ応答時に負荷慣性体で発生する約50Hzの残留振動の整定時間を、約11ms短縮できている。この結果を、図4に示す。

③ 「外乱抑制効果の評価実験」ならびに、「フルクロズドループ制御との性能比較実験」については、十分な成果が得られるまでには至らなかった。今後も、実験検証を継続していくこととする。

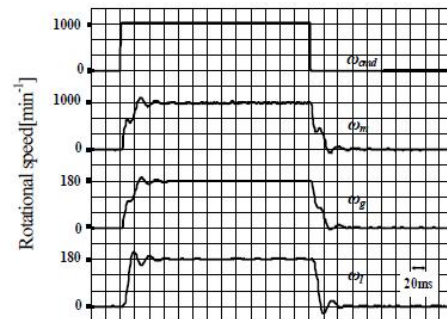


(a) Without model-based control ( $K_b = 0.0$ )

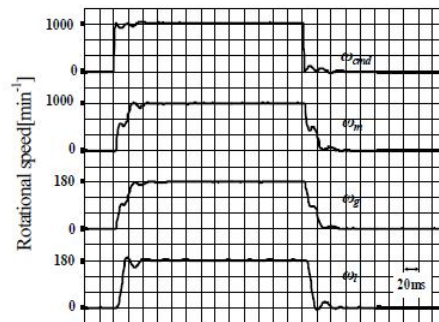


(b) With model-based control ( $K_b = 0.6$ )

図3 Experimental results



(a) Without model-based control ( $K_b = 0.0$ )



(b) With model-based control ( $K_b = 0.6$ )

図4 Experimental results

現状、得られた成果は、ここまで述べたとおりであり、今後も継続して検証していく内容も残っている。しかしながら、本研究で得られた手法は、簡便な構成で省エネルギー化が可能となり、現場での調整も容易な構成であることから、産業界の技術発展に貢献できるものとする。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

① Masahiko ITOH, Vibration Suppression Control for a Dies-Driving Spindle of a Form Rolling Machine: Effects of a Model-based Control with a Rotational Speed Sensor II, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 査読有, 2009, pp. 3827-3832.

② Masahiko ITOH, Vibration Suppression Control for a Dies-Driving Spindle of a Form Rolling Machine: Effects of a Model-based Control with a Rotational Speed Sensor I, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 査読有, 2008, No. WA3-2 (6 pages).

③ Masahiko ITOH, Torsional Vibration Suppression of a Twin-drive Geared System Using Model-based Control, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Motion Control, 査読有, 2008, pp.176-181.

[学会発表] (計0件)

[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

開設なし

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 昌彦 (ITO MASAHIKO)

仙台高等専門学校・機械システム工学科・

教授

研究者番号：00342452

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし