ツインサーボモータの協調制御による精密位置決め法
(遊星歯車を増設した直動機構の特性評価)内田 豊一^{*1}, 伊藤 彰人^{*2}, 北村 敏也^{*2}, 古屋 信幸^{*2}Positioning system with backlash compensation by twin motor cooperative control
(Evaluation of rectilinear motion mechanism installed planetary gear speed reducer)Toyokazu UCHIDA^{*1}, Akihito ITO^{*2}, Toshiya KITAMURA^{*2} and Nobuyuki FURUYA^{*2}^{*1,*2} University of Yamanashi Dept. of Mechanical Engineering
4-3-11, Takeda, Kofu City, Yamanashi, 400-8511 Japan

Received 24 January 2014

Abstract

Backlash occurs in gear drive systems that are used with machine tools and transport mechanisms. The problem with backlash is that it reduces positioning accuracy and tends to cause vibrations. In this paper, a twin-motor drive method that compensates for backlash by master-slave control is adopted. In full-closed loop control of master motor, the position is controlled by using a linear scale mounted externally which detects the machine position directly and feeds it back, whereas in semi-closed loop control of slave motor, the position is determined by using a rotary encoder mounted inside the motor which detects the motor position directly and feeds it back. An integral control factor on the master motor is required to minimized positioning errors when using a combination of semi-closed loop control (slave motor) and full-closed loop control (master motor), and a P (proportional) control system without I (integral) control factor neither on position nor velocity control is adopted as the slave motor's semi-closed loop control system, allowing the slave motor for a follow-up control after the master motor and to compensate for and eliminate mechanical backlash. We confirmed the effectiveness of this control method by simulation and experiment. Slave motor locates itself and master motor into final position by automatically adjusting the gap between itself and the master motor. At final positioning, the phase between main motor and slave motor is automatically controlled to compensate for the backlash upon positioning. It is shown that this method improves the positioning accuracy of the system.

Key words : Vibration of mechanism, Positioning, Servomechanism, Nonlinear compensation, Nonlinear dynamics

1. 緒 言

工作機械や搬送装置などでは、所望の速度で所望の出力トルクを得るため、ギヤ駆動系を用いて動力の回転速度を減速して出力トルクを増大させる減速機を用いているが、動力伝達を円滑に行うために、減速機内の歯車のかみ合い部にはバックラッシが設けられており、これが位置決め精度低下や振動の原因になっている。特に高負荷搬送になるほど位置決め精度は悪くなる。またバックラッシを構造的に取除いたボールねじ等を利用した搬送の場合はバックラッシの影響は少なくなるが、回転数に上限があり高速搬送には不向きである。

バックラッシは制御系にとって悪影響を与える要素である。バックラッシには不感帯要素で記述されたモデルが解析に用いられ(藤堂, 1963), バックラッシの影響を考慮した制御モデルの応答解析(小田井, 堀, 2000)(佐藤, 賀勢, 1998)が行なわれている。バックラッシの補償方法としては、ギヤ間にバネを入れて従動軸側のギヤを押す機械的補償方法(藤堂, 1963), 制御系に位相進み回路を入れて補償する方法(藤堂, 1963), 制振のためにモータ

の速度制御系に非線形要素を導入してギヤトルクを非線形補償する方法 (小田井,堀, 2000), 圧電素子によって補償する方法 (佐藤他, 1993), 予めバックラッシ量を測定しニューラルネットワークで学習して補償する方法 (Rastko, et al. 2000), バックラッシを非線形モデル化し逆動作で補償する方法 (Zhou, et al., 2006) (岩崎他, 2005) (田中他, 2008) などいろいろ提案されているが, 機械的拘束条件を変化させたり, ソフト的な処理を最適化させて位置決めを安定化させる必要がある. またツインモータドライブによる方法としては力制御を用いて制振制御する方法 (大場,大石, 2005) (林田他, 2001) があるが, 軸ねじり振動の抑制や摩擦力低減が目的である. 二つのモータを正転駆動用逆転駆動用で切り替えてバックラッシを打ち消す方法も提案されている (前川,小川, 2012).

筆者らは高負荷搬送で用いられている複数モータを使った協調制御搬送方式を応用して, 2 つのモータペアからなるツインモータ制御で機械的にギヤのバックラッシを補償する位置決め方法 (古屋他, 2007) を提案した. これに引き続いた報告 (古屋他, 2008) ではギヤ付きツインモータドライブでの回転駆動系において, バックラッシ要素を含む基本的な制御モデルを構築し, 個々のモータ制御を個別に位置決め制御してバックラッシ量を制御することにより位置決めの安定化を図った. その上でツインモータを同一推力方向に協調制御しながら, 最終位置決め時はツインモータ間の位相制御を行なってバックラッシ補償を行なう制御方法を提案した (Uchida, et al., 2010). この方法はツインモータ制御をマスタースレーブ制御として, 出力側に取り付けた外付けの高分解能エンコーダの出力信号を基に最終位置決めを行なうものである. その結果, ツインモータ間の位相制御により, モータエンコーダの 4 パルス (以下パルスを p と表す) 分のギヤバックラッシによる影響を抑え, 1 p (0.00157 rad) 内の精度で位置決めできること, 停止時の静的な位置決め精度の改善に効果のあることを確認した. また固有振動数の計測でシステムの剛性が上がることを確認した.

本報告では, ボールねじ搬送に比べ低コストでかつ高速であり, ラックの延長により容易に長距離搬送が可能となるラック&ピニオンを使った直線搬送系で, バックラッシによるガタつきによる精度低下を補償するためにツインモータ駆動系を採用し, その特性評価を行う. 直動機構においては高負荷搬送のため, ラック&ピニオンとモータ間に, さらに 1 段の減速機を入れてトルクの増幅を行う. 前報と同じく外付けの高精度エンコーダ信号を基にツインモータ制御をすることで位置決め精度向上を図ったが, 前報とは異なり, 位置決め時に位相差補償するバックラッシ補償制御を行わず, 常にマスターモータ側でフルクローズド制御を行ない, スレーブモータ側はセミクローズド制御で与圧を与える制御方式を新たに提案する. シミュレーションと動的な応答の実験により妥当性を確認し, インパルス応答による伝達関数分析により, 減速機を入れてシステムの動的剛性の改善, 出力エンコーダ 1 p 入力に対する応答特性改善効果を報告する.

2. 実験装置

直線搬送系の仕様を表 1,2,3 に, 実験に使用した装置を図 1, 制御系を図 2 に示した. ギヤのバックラッシ補償の実験は, サーボモータの出力軸に遊星歯車減速機を増設して, その出力軸にピニオンギヤがついた駆動系を 2 セット用いてツインモータを構成した.

被駆動側は, リニアガイド上に設置されたスライドテーブルに直線ラックギヤが固定されており, モータのピニオンギヤでこのラックギヤを駆動することにより, スライドテーブルを移動させる構造となっている. スライドテーブルには分解能 4 $\mu\text{m}/p$ のリニアエンコーダが取り付けられている. モータの位置分解能は 2000 p/rev であり, 減速機の減速比は 1/5, ピニオンギヤの PCD (= $\phi 28 \text{ mm}$) 上の分解能は 8.8 $\mu\text{m}/p$ となり, モータ位置分解能はリニアエンコーダの分解能の約 2.2 倍となる. モータの制御実行モジュールは Windows PC 上で作成した後 DSP ボードに転送し, DSP ボードからモータドライバに速度指令を出してモータ制御する.

Table 1 Basic gear specifications of mechanism

Motor driving side : Spur gear	Driven side : Rack gear
Gear module : $m=1$	Gear module : $m=1$
PCD : 28 mm	Rack length : 250 mm
Z : Number of teeth : 28	

Table 2 DSP board specifications

Name	Hardware Features	Item	Specification
DSP	TMS320C6713 (Texas Instruments)	Frequency	225 MHz
		Processor type	32 bit floating-point
A/D	ADS8364Y (Texas Instruments)	Resolution	16 bit
		Conversion speed	4 μ s
		Input range	± 10 V
		Accuracy	$\pm 0.1\%$ F.S.
D/A	AD7841 (Analog Devices)	Resolution	14 bit
		Conversion speed	40 μ s
		Output range	± 10 V
		Accuracy	$\pm 0.01\%$ F.S.
Counter	Binary up/down counter	Maximum counts	32 bit counter
		Input signal type	RS422
		Frequency response	8 MHz

Table 3 Basic motor specifications

Item	Specification	Item	Specification
Motor power	50 W	Torque constant	1.39 N $\cdot$ m/A
Rated speed (max)	3000 rpm	Inertia	0.063×10^{-4} kg $\cdot$ m ²
Rated torque(max)	0.159 N $\cdot$ m	Load inertia	0.63×10^{-4} kg $\cdot$ m ²
Maximum speed	4500 rpm	Weight	0.53 kg
Maximum torque	0.167 N $\cdot$ m	Encoder	2000p/rev

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Block diagram of backlash compensation system

3. バックラッシュ補償制御方法とシミュレーションモデル

3・1 遊星歯車を増設したツインモータ制御系のモデル

サーボモータとリニア駆動系のラック&ピニオン間にトルクを増幅するために、新たに遊星歯車減速機を介在させた。厳密な力学的モデルを求めると図3のように3慣性モデルになると考えられる(内田他, 2011)。図3の力学モデルを組み入れたツインモータ制御系の制御モデルを図4に示す。ツインモータの制御モードは、マスターモータ側は外付けリニアエンコーダの信号を基にフルクローズド制御を行ない、スレーブモータ側はモータ位置パルスを用いたフィードバックするセミクローズド制御としている。そのときの諸元を表4に示す。

マスターモータ側の制御は、位置指令と外付けリニアエンコーダ信号との差から位置偏差信号を生成したフルクローズド制御であり、速度制御系は角速度指令とモータの角速度との偏差から電流指令を生成する。速度制御系と電流制御系はモータドライバ内で処理している。シミュレーションモデルでは、送り機構のバックラッシュモデルをモータの慣性と減速機の慣性および負荷の慣性の3慣性モデルで構成している。またリニアエンコーダとモータエンコーダの分解能の差、量子化誤差を模擬するため、シミュレーションモデルには各エンコーダの量子化器 Q_1 , Q_2 を入れた。量子化器における信号の量子化 $Q(u)$ は、量子化単位を q 、小数点以下を切り捨てる整数化関数を $\text{Int}()$ とし、時間 t の信号 $u(t)$ を q で除算した時のその商の整数値を $\eta(t)$ とすると、

$$\eta(t) = \text{Int}(u(t)/q) \quad (1)$$

$$Q(u(t)) = q \cdot \eta(t) = q \cdot \text{Int}(u(t)/q) \quad (2)$$

となり、量子化後の真値に対する誤差 $\xi(u)$ は以下となる。

$$\xi(u) = u(t) - Q(u(t)) = u(t) - q \cdot \text{Int}(u(t)/q) \quad (3)$$

Table 4 Simulation parameters

Name	Symbol	Value
Reduction ratio	R_1	1/5
Ratio of rotation-linear motion converting	R_2	4 $\mu\text{m}/\text{rad}$
Motor moment of inertia	J_{m1}, J_{m2}	$0.063 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
1st Gear moment of inertia	J_{g11}, J_{g21}	$0.06 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Load	J_L	2.7 kg ($5.15 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
Motor damping coefficient	C_{m1}, C_{m2}	0 N $\cdot$ cm $\cdot$ s/rad
1st Gear damping coefficient in drive shaft	C_{d11}, C_{d21}	0.1 N $\cdot$ cm $\cdot$ s/rad
1st Gear damping coefficient at contact surface	C_{g11}, C_{g21}	0.01 N $\cdot$ cm $\cdot$ s/rad
2nd Gear damping coefficient at contact surface	C_{g12}, C_{g22}	0.001 N $\cdot$ cm $\cdot$ s/rad
Load damping coefficient	C_L	10 N $\cdot$ cm $\cdot$ s/rad
1st Gear Stiffness of torsion	K_{g11}, K_{g12}	800
2nd Gear Stiffness of torsion	K_{g21}, K_{g22}	2800
Velocity loop gain	K_{v1}, K_{v2}	1
Integral gain of velocity	K_{vi1}, K_{vi2}	0
Torque loop gain	K_{t1}, K_{t2}	1
Offset of Slave motor against Master motor	O_{fst}	Typically 1
Integral gain of position	K_{pi1}, K_{pi2}	Typically $K_{pi1}=1, K_{pi2}=0$
Position loop gain	K_{p1}, K_{p2}	Typically 10
Backlash in 1st gear	δ_{11}, δ_{21}	Typically 0.00436 rad
Backlash in 2nd gear	δ_{12}, δ_{22}	Typically 0.88 mm
Quantizer unit for emulating encoder pulse	q_1, q_2	$q_1=1$ (linear Encoder), $q_2=2.2$ (Motor)

Suffix number of the last or right digit; 1: Master motor side 2: Slave motor side

Suffix number of the next digit; 1: reduction gear side 2: Rack and pinion gear side

Fig. 3 Physical model of a twin motor drive system

Fig.4 System block diagram for twin motor drive with reduction gear

3・2 シングルモータ制御での実験結果とシミュレーションの比較

シミュレーションモデルを検証するため、シングルモータ駆動で位置ゲインが $K_{pl}=100$ 、リニアエンコーダでの移動量が 2500 p のステップ応答の条件で実験結果と比較した。結果を図 5 に示す。(a)は実験、(b)はシミュレーション結果である。この条件では目標位置で自励振動を起こしたが、自励振動の周波数分析結果を図 6 に示す。振動の主成分はバックラッシに起因するピークで、実験結果とシミュレーション結果それぞれで、減速機内のガタおよびピニオンギヤとラック間のバックラッシによる振動が現れており、バックラッシの効果が適切に表現できているモデルと推測できる。シミュレーションでは各バックラッシでの自励振動が残るが、実験では減衰し、高次の振動モードが残っている。

Fig. 5 Comparison between simulation and experimental by Step response of a single motor drive system ($K_{pl}=100$)
To validate the simulation model, the (a) of Fig.5 is simulation result for (b) of Fig.5 which is experimental result of step response by single motor drive at $K_{pl} = 100$. Both results have vibration at target position of 2500 p.

Fig. 6 Comparison between simulation and experimental of Frequency characteristics of single motor drive system by Step response ($K_{p1}=100$)
Main components of the vibration show that it caused by self-excited vibration within backlash of reduction gear and rack-and-pinion gear at the target position in this condition.

4. ツインモータ駆動における挙動解析

4・1 ステップ応答実験

制御系の特性の改善法を検討するためシミュレーションを行うことは重要で、特に各パラメータの制御特性への影響を定量的に評価するにはシミュレーションは有効である。先に求めた3慣性系のシミュレーションモデルの有効性を確認するために、ツインモータの実験装置を使ったステップ応答実験とシミュレーション結果との比較を行う。制御系のゲインはマスターモータ側とスレーブモータ側に同じ値を設定し、0.1秒後からステップ入力を与えた。ステップ量はエンコーダの移動量で2500 pである。ステップ応答時の各モータとテーブルの応答の実験結果とシミュレーション結果を図7に示した。図7(a)は実験、(b)はシミュレーション結果である(位置ゲイン $K_{pI}=10$)。位置ゲインを適切に与えるとオーバーシュートのない応答でツインモータを制御できることが実験とシミュレーションにより確認できる。ただこの時、短時間的には定常偏差が残る。この定常偏差に関しては次節にて考察する。

Fig. 7 Comparison between simulation and experimental by Step response of a twin motor drive system ($K_{pI}=10$)

Main components of the vibration show that they are caused by self-excited vibration within backlash of reduction gear and rack-and-pinion gear at the target position in this condition.

4・2 ツインモータ駆動時の比例積分ゲインの影響

ツインモータ駆動時の制御系のゲインについて検討した。図8(a)は比例ゲインをマスターモータ、スレーブモータ共に同じ値にして積分ゲインを零とした場合と、異なるゲインを与えた場合をシミュレーションで比較した。同じ積分ゲインだとお互いが拮抗しているので振動が現れるが、スレーブモータ側の積分ゲインを零にすると振動が減ることがわかる。また図8(b)は積分ゲインをマスターモータ側だけに設定し、マスターモータ側とスレーブモータ側の比例ゲインを同じ値にするか、マスターモータ側だけを大きくした結果である。同じ比例ゲインを設定すると静定するまで時間がかかるが、マスターモータ側に大きな比例ゲインを与えるとこちらが支配的になり早く収束することがわかった。

シミュレーションから得られた結果を踏まえて、実験によりスレーブモータ側の位置制御系の積分要素が設定されているかどうかで、最終的なテーブルの位置制御特性に与える影響を調べた。実験結果を図9に示す。図9(a)のようにモータエンコーダより分解能が高いリニアエンコーダ側の1p前後の制御になるとマスターモータとスレーブモータがお互い拮抗し、テーブルが目標位置で位置決めされない場合がある。これはスレーブモータ側が目標位置に対して偏差が残るとスレーブ側の出力が目標値に近づこうとしてマスターモータ側の位置決めに影響を与えるためである。このためスレーブモータ側の位置制御系をセミクローズド制御とした上で積分ゲインを零にしてツインモータ駆動を行なった(図9(b))。これによりスレーブモータ側は定常偏差が残るが、マスターモータ側のフルクローズド制御を基準とした制御を行なうことができることを確認した。つまりツインモータ駆動と

はいえ、制御的には完全なツイン制御ではなく、マスターモータを主とした制御の制御になっている。これに従来のように位置決め時にスレーブモータ側でバックラッシュ補正制御を行なわなくても、スレーブモータ側に定常偏差を残させることで駆動面に負荷を与える。単一位置指令をマスターモータとスレーブモータに与えることにより、外付けされたモータエンコーダより高分解能のリニアエンコーダ基準で位置決め制御を行なうことができる。

Fig. 8 Effect of control gain characteristics in experiment

If master motor and slave motor are set same motor control gains, final output of table is vibrated. If integral gain of slave motor are set zero, final output of table is not vibrated.

Fig. 9 Effect of slave motor control characteristics in experiment

Settling time is short, if proportional gain of master motor is set higher than proportional gain of slave motor.

4・3 遊星歯車減速機付ツインモータ駆動系の周波数解析

図1の写真に示した実験装置に図10のように、移動ステージに加速度ピックアップを取り付けて位置決めフィードバック制御を行った状態で、移動ステージの反対側を移動方向、つまり水平方向にインパルスハンマーで衝撃加振した。得られた結果からFFT解析により伝達関数を求めた。その結果は図11に示す。試験条件は、(a)シングルモータで遊星歯車減速機が無い場合、(b)ツインモータで減速機を取り付けた場合である。この(a)と(b)を比較すると、遊星歯車減速機の有無で、遊星歯車減速機が無い場合 1220Hz 近傍に現れていたピークが遊星歯車減速機を取り付けツインモータ駆動することにより 1180Hz 近傍にピーク周波数が下がりピーク値も下がっていることがわかる。また、500Hz 以下の低周波側も特性がシングルモータに比べ遊星歯車減速機付駆動系は平坦になっており、遊星歯車減速機付ツインモータで動剛性が改善されていることがわかる。

Fig. 10 Hammering test condition

Transfer function of the linear motion mechanism is measured by an acceleration pickup when impulse hammer is hit to an opposite side of the table.

Fig. 11 Comparison between twin-motor cooperation control and single motor control of Frequency characteristics by Impulse hammer ($Kp1=10$)

Frequency peak of around 1200 Hz is decreased if reduction gear is installed.

4・4 パルス送り制御

図 12～図 14 は遊星歯車減速機付ツインモータに 1p 単位で、0 から 5p までの送り制御と 5p から 0p までの戻り制御を行い、追従特性を調べた実験結果である。図 12 はテーブルの位置移動量で、図 13 はマスターモータの駆動量、図 14 はスレーブモータの駆動量である。各図において(a)は実験結果、(b)はシミュレーション結果である。シミュレーションは、エンコーダの量子化誤差を考慮し、リニアエンコーダ 1p を基準にモータエンコーダはその 2.2 倍の 2.2p 分の大きさに相当する量で量子化して階段状のフィードバック信号とした。図 12 のリニアエンコーダの位置で確認すると目標位置指令に対して少なくともリニアエンコーダの 1p で追従できていることがわかる。図 13 のマスターモータ側の動作は、マスターモータ側でフルクロード制御を行なっているため、モータ位置を往路から復路に切り替えたとき、マスターモータがバックラッシュ分動いてバックラッシュを詰め、図 14 のスレーブモータ側のモータと拮抗動作を行なっていることが実験結果とシミュレーション結果から確認できた。1p の中間での位置決めでは、実験、シミュレーション結果ともに 1p 分の振幅で振動を起こしていることも確認できた。

図 13 のスレーブモータ側の挙動は、モータ軸に取り付けてあるエンコーダの分解能がリニアエンコーダの 2.2 倍の大きさがあるため、量子化単位内ではモータフィードバックは一定となるので、モータ挙動がマスターモータより遅れて動いているように見える。シミュレーションではスレーブモータは位置決め時にステップ毎の目標位置で往復運動をしながら位置決めをしている。つまり、実験上では確認できなかったが、シミュレーション結果から、マスターモータが位置決めしているときに、スレーブモータが動いて目標位置に位置決めを行っていることがわかる。

Fig. 12 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving
Table position which is installed external high precision linear encoder is controlled within one pulse against target position.

Fig. 13 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving
Master motor position moves to reduce the backlash within each gear components in the mechanism.

Fig. 14 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving
Slave motor position moves to adjust the target position always under controlling.

図 15 はバックラッシュを 140 p 分空けたときに駆動したときのテーブルの位置移動量で、図 16 はマスターモータの駆動量、図 17 はスレーブモータの駆動量である。マスターモータ側が自動的にバックラッシュ分移動してバックラッシュを補償し、テーブルの目標位置で位置決めしていることがわかる。

Fig. 15 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving

Table position which is installed external high precision linear encoder is controlled within one pulse against target position.

Fig. 16 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving

Master motor position moves to reduce the backlash within each gear components in the mechanism.

Fig. 17 Comparison between Simulation and Experimental at one pulse driving

Slave motor position moves to adjust the target position always under controlling.

5. 結 言

減速機を追加したツインモータ駆動でギヤ駆動系に生じるギヤバックラッシュ補正を行うため、マスターモータ側でフルクローズド制御を行ない、スレーブモータ側でセミクローズド制御を行なうマスタースレーブ制御法を提案した。この方式では予めバックラッシュ量を補正しなくても、モータ内蔵エンコーダ精度以上の分解能を持つ外付けエンコーダ分解能精度での位置決めが可能である。シミュレーションと実験から得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 3 慣性モデルでのシミュレーションモデルを提案し、シミュレーションでマスタースレーブモータ制御の動特性を示すことができ、バックラッシュ特性も考慮できることを示した。
- (2) 減速機付モータはその減速比と内在バックラッシュに応じた系内バックラッシュの自励振動分を抑え、制御系を安定にさせることができることを示した。特にモータに直結する減速機内の粘性係数が制振特性に大きな影響を与える。
- (3) 減速機付ツインモータで外付けエンコーダの 1p 単位の送り制御ができることを示し、その駆動方向に関係なく 1p 以内で位置決め制御できることが判った。
- (4) ツインモータで高精度に位置決め制御を行なうためには、スレーブモータ側の積分ゲインをゼロにして、マスターモータ側で位置決め制御を行なう必要がある。

今後は、今回提案したマスタースレーブ制御での応答性や制御性を改善し、2 軸の直交駆動系に拡張して、高精度位置決めシステムとして、より実用性のある制御系を構築していく予定である。

文 献

- 古屋信幸, 戸羽弘安, 小栗崇嘉, 真嶋亮, 2 台のサーボモータの協調制御による歯車減速機のバックラッシュ補償(第 1 報): バックラッシュモデルによる解析と補償法の検討, 精密工学会誌, Vol.73, No.4 (2007), pp.502-506.
- 古屋信幸, 小栗崇嘉, 真嶋亮, 内田豊一, 2 台のサーボモータの協調制御による歯車減速機のバックラッシュ補償(第 2 報): シミュレーションによる解析と制御アルゴリズムへの適用, 精密工学会誌, Vol.74, No.10 (2008), pp.1107-1112.
- 林田宣宏, 矢向高弘, 村上俊之, 大西公平, ツインドライブシステムを用いたセンサレスバイラテラルロボット マニピュレータ, 精密工学会誌 Vol.67, No.11(2001), pp.1834-1838.
- 伊藤昌彦, 賀勢晋司, 歯車減速機構を有する機械系の過渡振動抑制 (モデルベースコントロールの適用効果), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.623(1998), pp.2596-2601.
- 岩崎誠, 宮路匡, 松井信行, ロストモーション補償による工作機械テーブル駆動系の高精度軌跡制御, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.125, No.6 (2005), pp.616-622.
- 前川 明寛, 小川 順也, 2 モータ式ノーバックラッシュ駆動制御システム(第 1 報, 目標値応答に関する解析と実験), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No. 791 (2012).
- 小田井正樹, 堀 洋一, ギヤトルク補償に基づくバックラッシュをもつ二慣性系の速度制御, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.120-D, No.1 (2000), pp.5-10.
- 大場譲, 大石潔, 軸ねじり振動を抑制したツインドライブシステムによる力帰還型摩擦フリーバイラテラルシステム, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.125, No.6(2005), pp.575-581.
- Rastko, R., Selmic, F. and Lewis, L., Backlash compensation in nonlinear systems using dynamic inversion by neural networks, Asian Journal of Control, Vol. 2, No.2 (2000), pp. 76-87.
- 佐藤海二, 今田滋彦, 村山禎恒, 下河辺明, 機能化送りねじ機構(第 1 報, 原理と試作機構の諸特性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.558 (1993), pp.392-399.
- 佐藤正喜, 須藤靖, 進藤泰之, 内山博喜, バックラッシュを含む歯車減速機構のモデル化, 日本機械学会東北支部第 37 期総会・講演会講演論文集, Vol.37(2002), pp.116-117.
- 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎, 増田郁朗, 精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究(第 3 報): 非線形摩擦モデルを用いた制御による位置決め精度向上, 精密工学会誌, Vol.74, No.11 (2008), pp.1171-1175.
- 藤堂勇雄, バックラッシュのある制御系の数学的取扱いと補償対策, 生産研究, Vol.15, No.11(1963), pp.436-443.

- Uchida T., Ito A., Oshima T. and Furuya N., Positioning system based on twin motor cooperative control with gear backlash compensation, Journal of the 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2010).
内田豊一, 伊藤彰人, 大島達也, 古屋信幸, 複数サーボモータの協調制御による精密位置決め法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.778 (2011), pp.2280-2289.
Zhou, J., Wen, C. and Zhang, Y., Adaptive output control of nonlinear systems with uncertain dead-zone nonlinearity, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol.51, No.3 (2006), pp.504-511.

References

- Furuya, N., Oguri, T., Mashima, A. and Uchida, T., Backlash compensation of reduction gears by twin motor cooperative control (2nd Report) : study on control method based on simulation analysis, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.74, No.10 (2008), pp.1107-1112 (in Japanese).
Furuya, N., Toba, Y., Oguri, T. and Mashima, A., Backlash compensation of reduction gears by twin motor cooperative control (1st Report) : Study on compensation method using backlash model, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.73, No.4 (2007), pp.502-506 (in Japanese).
Hayashida, N., Yamukai, T., Murakami T. and Oonishi K., A Sensorless bilateral robot manipulator based on twin drive System, The Japan Society for Precision Engineering, Vol.67, No.11 (2001), pp.1834-1838 (in Japanese).
Itoh, M. and Kase, S., Suppression of transient vibration for geared mechanical system : Effects of model-based control, Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.623 (1998), pp.2596-2601 (in Japanese).
Iwasaki, M., Miyaji, T. and Matsui, N., High-precision contouring control of table drive system in machine tools using lost motion compensation, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.125, No.6 (2005), pp.616-622 (in Japanese).
Maekawa, A. and Ogawa, J., No-backlash control system by two-motor drive (1st.Report, the analyses and experiments of reference response), Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.791 (2012) (in Japanese).
Odai, M. and Hori, Y., Speed control method of two-inertia system with a backlash based on gear torque compensation., Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.120-D, No.1 (2000), pp.5-10 (in Japanese).
Ooba, Y. and Ooishi, K., Force-reflecting type friction free bilateral system based on twin drive control system with torsional vibration suppression, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.125, No.6 (2005), pp.575-581 (in Japanese).
Rastko, R., Selmic, F. and Lewis, L., Backlash compensation in nonlinear systems using dynamic inversion by neural networks, Asian Journal of Control, Vol. 2, No. 2 (2000), pp. 76-87.
Sato, K., Imada, S., Murata, S. and Shimokohbe, N., An active lead screw mechanism : 1st Report, Principle and basic characteristics, Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.59, No.558 (1993), pp.392-399 (in Japanese).
Satoh, M., Sutoh, Y., Sintoh, S. and Uchiyama, H., Modeling of reduction gear mechanism with backlash., Proceedings of the 37th Japan Society of Mechanical Engineers TOHOKU branch general meeting, Vol.37 (2002), pp.116-117 (in Japanese).
Tanaka, Y., Ooiwa, T., Ootsuka, J. and Masuda I., Study on friction model of linear ball guide way for precision positioning control (3rd Report) : Accuracy improvement by Control method using nonlinear frictional model, The Japan Society for Precision Engineering, Vol.74, No.11 (2008), pp.1171-1175 (in Japanese).
Toudou, I., Mathematical handling of the control system with a backlash and its compensation measures., Seisan-kenkyu, Vol.15, No.11 (1963), pp.436-443 (in Japanese).
Uchida, T., Ito, A., Oshima, T. and Furuya, N., Positioning System Based on Twin Motor Cooperative Control with Gear Backlash Compensation, Proceedings of the 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2010).
Uchida, T., Ito, A., Oshima, T. and Furuya, N., Positioning system with backlash compensation by twin motor cooperative control, Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.77, No.778(2011), pp.2280-2289 (in Japanese).
Zhou, J., Wen, C. and Zhang, Y., Adaptive output control of nonlinear systems with uncertain dead-zone nonlinearity, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol.51, No.3 (2006), pp.504-511.