2 モータ式ノーバックラッシュ駆動制御システム* (第3報, 特性改善に関する解析と実験)

前川 明寛^{*1}, 小川 順也^{*2}

No-Backlash Control System by Two-Motor Drive (3rd. Report, The Analyses and Experiments of Performance Improvement)

Akihiro MAEKAWA^{*1} and Junya OGAWA^{*1}Meijo Univ. Dept. of Vehicle and Mechanical Engineering
1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan

A no-backlash drive control technique in which two motors drive a load axis, as one is for a plus direction and another is for a minus direction, has two problems :1) the 1st natural frequency of the drive system may cause a backlash, 2) the drive system has a remarkable power loss. For the former problem, we introduce a notch filter, with its inverse notch filter in some cases, against the 1st natural frequency, which improves the no-backlash drive range, into the simulation. This method is robust, because the 1st natural frequency of the drive system is not related to the load inertia, and related to the motors inertia and the spring stiffness of the drive line. For the latter problem, we employ a torque crossover method, in which a part of torque reference of the drive-side motor gives to the driven-side motor and the resulted torque reference of the driven-side one is reduced. Our experiments showed the total motor current was reduced by half.

Key Words : Motion Control, Vibration of a Mechanism, Servo-Mechanism, No-Backlash, Steering System

1. 緒言

自動車のインテリジェント化は益々進歩しており, 障害物センサなどを搭載することで, オートクルージングやアクティブセーフティ機能を搭載した乗用車が実用化されてきている. 一方, 自動車の無人運転に関しては安全性・信頼性のみならず, 事故時の責任所在など問題によりすぐに普及するとは言い難いが, 米国では DARPA・グランド・チャレンジなど無人車両によるレースも Sebastian ら⁽¹⁾から報告されている.

車両を無人で走行させるためには GPS などを用いた自車位置標定技術と車両誘導制御技術を組み合わせて行う必要がある. 車両の誘導はモータなどでハンドル操舵し, ハンドルラックアンドピニオン機構などを介して前輪を駆動する. ハンドルには遊び(不感帯)があり, ラックアンドピニオン機構のバックラッシュがその原因の一つである. 適度なハンドルの遊びはドライバが運転する際に負担を軽減する. しかし, 車両を無人運転する場合にはハンドルの遊びは操舵制御系のむだ時間として作用するため, 操舵制御系の応答性低下や車線変更時にオーバーシュートを生じる. この傾向は車速の増加に伴い顕著⁽²⁾になる. したがって, 自動操舵が必要となる無人運転車両では, ハンドルの遊び, すなわちバックラッシュの影響を極力減らす操舵システムが必要となる.

積極的にバックラッシュを打ち消すノーバックラッシュ補償として, 古屋ら⁽³⁾⁽⁴⁾が2台のモータを用いて1つの負荷を駆動する方法を提案している. 古屋らの方法は予備駆動により事前にバックラッシュを打ち消すように2台のモータを少しだけ動かし, その角度をプリセットする. その後, プリセットした角度を保持しながら, 2台のモータ角度を2台の位置及び速度制御器でそれぞれ位置決めを行い, 負荷をノーバックラッシュ駆動する.

* 原稿受付 2013 年 7 月 6 日

^{*1} 正員, 名城大学 理工学部 交通機械工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1丁目501)^{*2} 名城大学大学院 理工学研究科 交通科学専攻 (現(株)第一システムエンジニアリング)

E-mail: maekawa@meijo-u.ac.jp

一方、筆者ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾は2台のモータをそれぞれ正転駆動用、逆転駆動用として組合せて、1台の位置及び速度制御器で1つの負荷を駆動し制御的にバックラッシュを打ち消すノーバックラッシュ駆動制御システムを提案しており、その目標値応答や外乱応答について述べてきた。その結果、本駆動制御系は、その一次共振振動に起因するバックラッシュを生じやすい、通常の1モータ駆動と比してモータの発熱量や容量が大きくなるなどの問題点や、バックラッシュ発生の有無と駆動側と負荷の慣性比との関係明確化などの課題を指摘している。本報告では一次共振振動によるバックラッシュ発生の抑制やモータ発熱量の低減について解析、シミュレーション及び実験を通じて改善した結果を述べる。

2. システムの基本構成

図1にノーバックラッシュ制御の原理、表1に駆動パターンを示す。図1に示すように歯車を取り付けた正転駆動用減速器付きモータ（以下、正転モータと称する）と逆転駆動用減速器付きモータ（以下、逆転モータと称する）の2台のモータを使用して負荷軸の角度、角速度を制御する。オフセットトルクとは正転モータは正転方向、逆転モータは逆転方向に、常時、同じ大きさで加え続けるトルクのことをいう。ノーバックラッシュ制御では表1に示すように正転及び逆転モータが負荷にオフセットトルクを加え負荷軸を保持した状態で、正転モータ、逆転モータのどちらか一方のトルクを増加させることで指定した回転方向に負荷を駆動する。このとき他方のモータは負荷の回転方向と反対にオフセットトルクを加え続けることにより、モータの歯車を負荷軸の歯車に押し付けてバックラッシュを抑制する。

Table 1 The driving patterns for the state of the load axis

Torque State	Forward drive motor		Reverse drive motor		Load axis
	Offset torque	Driving torque	Offset torque	Driving torque	
Standing state	const.(+)	0	const.(-)	0	0
Forward drive	const.(+)	$T_{dr}(+)$	const.(-)	0	$T_{dr}(+)$
Reverse drive	const.(+)	0	const.(-)	$T_{dr}(-)$	$T_{dr}(-)$

Fig. 1 The view of the no-backlash control

3. 駆動システムの解析

図1に示す駆動システムは正転モータ、負荷、逆転モータの3個のマス要素と、減速機など動力伝達機構の2つのバネ要素で構成される3自由度系となる。ノーバックラッシュ駆動システムのブロック図を図2に示す。目標値応答⁽⁶⁾の検討結果に基づき、ノーバックラッシュ駆動では各モータ軸の平均位置及び平均速度をフィードバックする。バックラッシュは動力伝達系のバネ剛性に不感帯を持たせたモデリングとする。システムへの入力は角度目標値と外乱トルクである。解析はオフセットトルクを負荷軸に加えてバックラッシュを無くし、負荷を正転させた状態で外乱が加わった時の状態を対象に行った。その際のブロック図を図3に示す。

Fig. 2 The block diagram of the no-backlash control system

4. ノーバックラッシュ制御の特性改善

4・1 一次共振振動の影響低減

本ノーバックラッシュ制御でネックとなるのは共振周波数 ω_{p1} の影響である。その特性改善を表2に示す駆動系諸元にて非線形シミュレーションにより検討した。この場合、共振周波数 ω_{p1} が10Hz、 ω_{p2} が22Hzになる。シミュレーションでは位置制御をP制御、速度制御をPI制御とした。また、式(2)、式(3)より目標値応答、外乱応答ともにその極に共振周波数 ω_{p1} があるので、シミュレーションでは外乱応答の挙動で実施した。

Table 2 The specifications of the drive system

Position control gain	$K_p = 85 \text{ 1/s}$
Rate control gain	$K_v = 2 \text{ V/(rad/s)}$
Current feedback gain	$K_i = 0.192 \text{ A/V}$
Motor torque constant	$K_T = 0.069 \text{ Nm/A}$
Motor inertia	$J_M = 2.3 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
Motor viscous friction	$D_M = 6.0 \times 10^{-4} \text{ Nm/(rad/s)}$
Total gear ratio	$G = 100$
Spring stiffness of the drive line	$K = 8900 \text{ Nm/rad}$
Load inertia	$J_L = 1.16 \text{ kgm}^2$
Load viscous friction	$D_L = 6.0 \text{ Nm/(rad/s)}$

4・1・1 シミュレーション条件

- オフセットトルクは0.06 Nm (モータ定格トルクの10%)、制御中は常時加える。
- バックラッシュは負荷軸換算で1度とする。
- 外乱トルクは正弦波の場合、1Hzで $\pm 12 \text{ Nm}$ (駆動軸換算でモータ定格トルクの20%)とする。
- 外乱トルクはパワーを一定で加える。よって、外乱トルクの振幅は周波数に反比例する。

オフセットトルクの設定理由は次の通りである。オフセットトルクは大きく設定するほどバックラッシュが発生しにくい、駆動側モータから見ると負荷駆動に寄与しない余分なトルクになる。よって、オフセットトルクは定格トルクの5～20%程度が実用的と考えられるので、モータ定格トルクの10%とした。一方、外乱トルクは、外乱の正負に応じて駆動側モータと従動側モータが滑らかに切り替わることを確認すべく、静的にオフセットトルクよりも大きい値となるよう1Hzでモータ定格トルクの20%とした。さらに、路面の凹凸特性を考慮して周波数に反比例させた。

4・1・2 従来方式

従来のノーバックラッシュ駆動制御システム⁽⁷⁾へ角度目標値に振幅 ± 5 度、周波数0.2Hzの正弦波を、外乱トルクとして2.5Hz、4Hz、5Hz、8Hz、10Hzを与えた結果を図4から図8に示す。図4、図5、図7より2.5Hz、4Hz、8Hzではモータから負荷への伝達トルク T_{MP} 、 T_{MM} が零となっておらずバックラッシュは発生していないが、図6、図8より5Hz、10Hzでは伝達トルク T_{MP} 、 T_{MM} が零となりバックラッシュが発生している。また、 T_{MP} の時間応答の時間軸を拡大した図を図4(e)に示す。図4(e)より発生している振動は10Hzが顕著であり共振周波数 ω_{p1} で振動しているがわかる。

Fig.4 Simulation results under the disturbance torque of 2.5Hz

Fig.5 Simulation results under the disturbance torque of 4Hz

Fig.6 Simulation results under the disturbance torque of 5Hz

Fig.7 Simulation results under the disturbance torque of 8Hz

Fig.8 Simulation results under the disturbance torque of 10Hz

以上の結果より本駆動システムは共振周波数 ω_{p1} 及びその2分の1の周波数の外乱に弱い。周波数 5Hz の外乱トルクを加えた場合のトルク目標値 T_{ref} と正転側トルク目標値 T_{rp} をそれぞれFFTした結果を図9に示す。図9(a)では共振周波数 ω_{p1} に相当する 10Hz 成分は零であるが、図9(b)より 10Hz 成分が発生していることがわかる。 ω_{p1} の2分の1の周波数でバックラッシュが発生した原因は、正転側トルク目標値 T_{rp} 及び逆転側トルク目標値 T_{rm} が正弦波を半波整流した波形になり、そこに含まれる二次高調波により共振周波数 ω_{p1} が励起されたためである。また、周波数 10Hz の外乱トルクを加えた場合は基本波により共振周波数 ω_{p1} が励起された。

Fig.9 FFT for T_{ref} and T_{rp}

4・1・3 特性改善 1 ノッチフィルタの挿入

対策として、図10で示すようにフォワードラインの整流機能の直後に共振周波数 ω_{p1} をノッチ周波数とするノッチフィルタを挿入し、共振周波数 ω_{p1} の影響を低減した正転及び逆転モータ発生トルク T_P , T_M を生成した。その理由は、式(4)より共振周波数 ω_{p1} はモータ慣性モーメント、ギア比、動力伝達系のバネ剛性のみによって決まり、負荷の影響を受けないので実用可能と判断したためである。また、目標波形や外乱波形に共振周波数 ω_{p1} が含まれていなくても整流機能により高調波として共振周波数 ω_{p1} が発生するため、ノッチフィルタをフィードバックラインやフォワードラインの整流機能の前に挿入しても効果はない。

Fig.10 The block diagram of the no-backlash control system with the notch filter

図3に示すブロック図でノッチフィルタを速度制御ゲイン K_V の出力に挿入した場合の位置制御の開ループボード線図を図11に示す。ボード線図の入力は速度目標値、出力は正転及び逆転モータの平均角度である。正転及び逆転モータの平均角度には共振周波数 ω_{p1} が現れないが、伝達トルク T_{MP} 、 T_{MM} には共振周波数 ω_{p1} が現れる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図11に示すようにノッチフィルタを挿入すると $10\text{Hz}(=63\text{rad/s})$ のゲインが低下し、共振周波数 ω_{p1} の影響を抑制する。一方、位相特性は $5\text{Hz}(=31\text{rad/s})$ を越えた周波数から位相遅れが顕著となり位相余裕は急激に減少する。位置制御ゲイン K_p を図10に示すブロック図でオーバーシュートが発生しない限界となるよう再調整した。調整の結果、位置制御ゲイン K_p は $85(=39\text{dB})$ から $32(=30\text{dB})$ に低下した。図11より位置制御ゲイン K_p の調整を行うことで位相余裕は40度程度に設定されていることが分かる。

Fig.11 Bode plot of the position control open loop char.

駆動システムにノッチフィルタを挿入し、図4から図8と同様に角度目標値として振幅 ± 5 度、周期5秒の正弦波を与えると同時に、外乱トルクとしてその周波数を 2.5Hz 、 4Hz 、 5Hz 、 8Hz 、 10Hz と変化させて正弦波を与えた結果を図12から図16に示す。ただし、図14、図16より伝達トルク T_{MP} 、 T_{MM} が零となっておらず、共振周波数 ω_{p1} とその2分の1の周波数においても外乱トルクに起因するバックラッシュを抑制できた。ただし、負荷角速度 ω_L を従来方式と比較すると位置制御ゲイン K_p を下げたことにより、共振周波数 ω_{p1} に関係が無い 2.5Hz 、 4Hz 、 8Hz の外乱トルクに対して角速度の変動幅は増加している。

Fig.12 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 2.5Hz

Fig.13 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 4Hz

Fig.14 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 5Hz

Fig.15 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 8Hz

Fig.16 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 10Hz

4・1・4 特性改善2 ノッチフィルタ及び逆ノッチフィルタの挿入

前節では駆動系の共振周波数 ω_{p1} の影響を低減すべく図10に示すノッチフィルタを挿入した結果、位置及び速度フィードバック信号に位相遅れを生じたため位置制御ゲイン K_p を下げざるを得なかった。そこで、ノッチフィルタの逆特性を持つ逆ノッチフィルタを図17に示すように位置及び速度フィードバックラインに追加した。これによりノッチフィルタに起因する位相遅れをキャンセルでき、かつ、図9に示すように整流機能により共振周波数 ω_{p1} の影響を低らせるので、正転伝達トルク T_{MP} 及び逆転伝達トルク T_{MM} に現れる共振周波数 ω_{p1} の振動を低減できた。駆動システムにノッチフィルタと逆ノッチフィルタを挿入し、図4から図8と同様に角度目標値に振幅 ± 5 度、周期5秒の正弦波を与え、外乱トルクの周波数を2.5Hz, 4Hz, 5Hz, 8Hz, 10Hzと変化させて与えた結果を図18から図22に示す。この場合、位置制御ゲイン K_p はノッチフィルタなしの場合と同じ85を維持できた。図20, 図22より伝達トルク T_{MP} , T_{MM} が零となっておらず、ノッチフィルタのみを挿入したときと同様に共振周波数 ω_{p1} とその2分の1の周波数においても外乱トルクに起因するバックラッシュを抑制できた。

Fig.17 The block diagram of the no-backlash control system with the notch filter & its inverse notch filter

(a) Load angular velocity ω_L (b) Load driving torque T_L (c) Motor generating torque T_p, T_M (d) Transmission torque T_{MP}, T_{MM}

Fig.18 Simulation results with the notch filter & its inverse notch filter under the disturbance torque of 2.5Hz

(a) Load angular velocity ω_L (b) Load driving torque T_L (c) Motor generating torque T_P, T_M (d) Transmission torque T_{MP}, T_{MM}

Fig.19 Simulation results with the notch filter & its inverse notch filter under the disturbance torque of 4Hz

(a) Load angular velocity ω_L (b) Load driving torque T_L (c) Motor generating torque T_p, T_M (d) Transmission torque T_{MP}, T_{MM}

Fig.20 Simulation results with the notch filter & its inverse notch filter under the disturbance torque of 5Hz

(a) Load angular velocity ω_L (b) Load driving torque T_L (c) Motor generating torque T_P, T_M (d) Transmission torque T_{MP}, T_{MM}

Fig.21 Simulation results with the notch filter & its inverse notch filter under the disturbance torque of 8Hz

その理由は以下の通りである．まず，共振周波数 ω_{p1} の2分の1の外乱トルクが印加された場合，逆ノッチフィルタは素通りし，整流機能により現れる共振周波数 ω_{p1} の振動はノッチフィルタで除去される．

次に，共振周波数 ω_{p1} の外乱トルクが印加された場合について述べる．図22の2.3秒から2.7秒までの間を拡大した図を図23に示す．図23より T_{MP} と T_{MM} の応答には外乱トルクの周波数である10Hzと二次高調波である20Hzの振動が現れる．図17のトルク目標値 T_{ref} ，正転側トルク目標値 T_{rp} ，及びノッチフィルタ出力信号をそれぞれFFTした結果を図24に示す．共振周波数 ω_{p1} と等しい10Hzの外乱トルクが印加された場合，外乱トルクは正転側と逆転側に同相で加わるために位置及び速度フィードバック信号の平均値にも現れ，逆ノッチフィルタにより一旦増幅される．そのFFT結果を図24(a)に示す．次に，図24(b)に示すように整流機能により基本波の10Hz成分が4分の1程度に減少すると同時に二次高調波である20Hzが発生する．そして，図24(c)に示すようにノッチフィルタにより10Hzの振動はさらに低減され， T_P と T_M の応答には20Hzの振動が現れている．よって，図23に示す T_{MP} と T_{MM} の応答には T_P と T_M からの20Hzと，負荷から反力として伝わった外乱トルク T_d に起因する10Hzの振動が現れている．

4・1・5 オフセットを有する外乱トルクに対する応答

これまで外乱トルクは零を中心に正逆方向に加わるものとして検討を進めてきた．一方，水勾配の著しい路面を走行するには図25に示す水勾配によるオフセットと路面の凹凸による周波数外乱が加わりうる．この場合，外乱トルクは一定方向となり駆動側と従動側のモータが切り替わらず整流機能を素通りするため，位置及び

速度フィードバックの逆ノッチフィルタは、フォワードラインのノッチフィルタと相殺されて効果がなくなる。シミュレーション条件としてこれまでと同じくオフセットトルク 0.06Nm (モータ定格トルクの 10%), 角度目標値に振幅 ± 5 度, 周波数 0.2Hz の正弦波を, 外乱トルクとして図 25 に示す 16Nm (駆動軸換算で 0.16Nm , モータ定格トルクの 27%) のオフセットと振幅 $\pm 1.2\text{Nm}$ (駆動軸換算で 0.012Nm , モータ定格トルクの 2%), 周波数 10Hz の正弦波を与えた。ノッチフィルタのみを挿入した場合の結果を図 26 に, ノッチフィルタと逆ノッチフィルタの両方を挿入した場合の結果を図 27 に示す。図 26 よりノッチフィルタのみ挿入した場合は外乱トルクに起因する 10Hz が抑制でき, かつ, 伝達トルク T_{MP} , T_{MM} が零となっていないので, バックラッシュが生じていない。一方, ノッチフィルタと逆ノッチフィルタの両方を挿入した場合は, 図 27 (d) で T_{MP} が零となりバックラッシュが生じていることがわかる。よって, ノッチフィルタと逆ノッチフィルタの両方を用いる対策法は, 大きなオフセットを持つ外乱トルクに対しては効果が得られない。

Fig.25 Input to the disturbance torque for the no-backlash control system

Fig.26 Simulation results with the notch filter under the disturbance torque of 10Hz with the torque offset

Fig.27 Simulation results with the notch filter & its inverse notch filter under the disturbance torque of 10Hz with the torque offset

4・1・6 外乱トルクのステップ応答

オフセットトルクを 0.06Nm (モータ定格トルクの 10%), 角度目標値を 1 度に保った状態で, 外乱トルクを負方向に 6Nm (駆動軸換算でモータ定格トルクの 10%) のステップを時定数 0.05 秒の二次ローパスフィルタを通して加えた。外乱トルクの振幅は, ステップ入力では応答に含まれる周波数成分が一樣になること, および正弦波では振幅を周波数に反比例させたことから正弦波の半分とした。また, ローパスフィルタを通した理由は, 外乱トルク T_d はタイヤ剛性等で少しなまると考えたためである。1) ノッチフィルタなし, 2) ノッチフィルタのみ挿入, 3) ノッチフィルタと逆ノッチフィルタを挿入した場合の結果を図 28 から図 30 に示す。1) ノッチフィルタなし, 及び, 3) ノッチフィルタと逆ノッチフィルタを挿入した場合, T_{MP} と T_{MM} の応答には共振周

波数 ω_{p1} の振動が現れた。一方, 図28(b),(c), 図29(b),(c), 及び図30(b),(c)より, 2) ノッチフィルタのみ挿入の場合は T_{MP} と T_{MM} の応答で共振周波数 ω_{p1} の振動は抑制されているが, 他の場合に比べて位置制御ゲインを低くせざるを得なかったため外乱の影響が大きいことがわかる。

Fig.28 Step response without the notch filter($K_p = 85$)

Fig.29 Step response with the notch filter($K_p = 32$)

Fig.30 Step response with the notch filter & its inverse notch filter($K_p = 85$)

4・1・7 対策方法と効果のまとめ

表3に本制御システムへの対策法と効果をまとめた。ノッチフィルタと逆ノッチフィルタによる対策法はノッチフィルタ対策なしと同じ位置制御ゲインを確保できるため, 応答性は良く, かつ, 通常の周波数外乱によって生じる共振周波数 ω_{p1} の影響を抑制できる。しかし, 大きなオフセットを持つ周波数外乱では共振周波数 ω_{p1} で加わる外乱の影響を抑制できない。一方, ノッチフィルタによる対策法は, すべての種類の外乱に対して共振周波数 ω_{p1} を抑制できるがノッチフィルタにより位相が遅れるためゲインを低減せざるを得ず応答性が低下, 外乱による位置ずれは増加する。よって, 水平な路面や緩やかな水勾配の路面を走行させる場合はノッチフィルタと逆ノッチフィルタの組み合わせが良い。また, 水勾配の著しい路面を走行させる場合はノッチフィルタのみでノーバックラッシュ駆動を行うのが良い。具体的には工場内など屋内走行時の操舵制御にはノッチフィルタと逆ノッチフィルタの組み合わせ, 屋外走行時の操舵制御にはノッチフィルタによる対策法が適切であると考えられる。

Table 3 Measures and effects for the no-backlash control system

:Good, :Inadequate, ×:Bad

Measure Disturbance type	Conventional (Without the notch filter)	With the notch filter	With the notch filter & its inverse notch filter
Sinusoidal input	× Backlash occurs at ω_{P1} and the half of ω_{P1} .	ω_{P1} restraint is sufficient.	ω_{P1} restraint is sufficient.
Sinusoidal input with the large offset	× Backlash occurs at ω_{P1} and the half of ω_{P1} .	ω_{P1} restraint is sufficient.	× Backlash occurs at ω_{P1} .
Step input	Position error ω_{P1} restraint is not sufficient.	Position error ω_{P1} restraint is sufficient.	Position error ω_{P1} restraint is not sufficient.

4・2 消費電力低減

ノーバックラッシュ駆動では通常の1モータ駆動と比べてモータ電流, すなわち消費電力が増加する. この理由は駆動側モータ, 従動側モータともにオフセットトルクを加える必要があること, さらに, 駆動側モータは負荷を駆動する際, 自身のオフセットトルクと負荷駆動トルクのみならず, 従動側モータのオフセットトルク及び摩擦トルクも発生させる必要があるためである. その特性改善を図31に示す実験装置を用いて行った. 実験装置の諸元を表4に示す. 実験では位置制御をP制御, 速度制御をPI制御で実施した. オフセットトルクは0.05 Nm (モータ定格トルクの15%) とし, 制御を行う間は常に加え続けた.

Fig.31 The experimental equipment

Table 4 The specifications of the experimental equipment

Encoder resolution	Motor	2048 Pulse/rev.
	Load	7200 Pulse/rev.
Motor power		100 W
Motor & drive shaft inertia		3.1×10^{-4} kgm ²
Load inertia		1.1×10^{-4} kgm ²
Total gear ratio		34.3
Backlash in terms of load axis		1°

4・2・1 特性改善 トルククロスオーバの導入

ノーバックラッシュ駆動を維持しながらモータ電流を低減させる手法としてトルククロスオーバを導入した. トルククロスオーバとは, 駆動側モータのトルク目標値の一部を従動側モータに与えて従動側モータのオフセットトルクを減らす仕組みである. トルク目標値 T_{ref} が大きいほど, 従動側モータのオフセットトルクは減少する. その制御系構成を図32に示す. トルククロスオーバの導入により, 正のトルク目標値 T_{ref} を入力した場合, 正方向整流機能の出力は T_{ref} となるが, 逆方向整流機能の出力は零のままである. 次に, クロスオーバ部分を通じ, 逆転側には正の値 $T_{ref} \times K_c$ となる. K_c はクロスオーバゲインである. この時, 正転側は T_{ref} のまま変わらない. その後, 各モータにオフセットトルクを加え, モータを駆動する. 逆転モータには負値であるオフセットトルク T_o に, 正値 $T_{ref} \times K_c$ が加わるため, クロスオーバ導入前よりも電流が減少する. また, 逆転モータの電流が減少することで, 正転モータが逆転モータを回転させるトルクも減少するため, 正転モータも電流が減少する.

Fig.32 The block diagram of the no-backlash control with torque crossover

4・2・2 トルククロスオーバの比較実験

1モータ駆動, ノーバックラッシュ駆動(トルククロスオーバ無), ノーバックラッシュ駆動(トルククロスオーバ有)の比較実験を行った. 実験では振幅 ± 3 度, 周期5秒の正弦波を目標値として与えた. 1モータ駆動, ノーバックラッシュ駆動(トルククロスオーバ無), ノーバックラッシュ駆動(トルククロスオーバ有)の実験結果をそれぞれ図33, 図34, 図35に示す.

Fig.33 The experimental results of one motor control system

Fig.34 The experimental results of the no-backlash control system without the torque crossover

Fig.35 The experimental results of the no-backlash control system with the torque crossover

負荷軸角度の応答は、1 モータ駆動ではバックラッシュにより目標波形と応答波形でズレを生じているが、ノーバックラッシュ駆動ではトルククロスオーバー有、トルククロスオーバー無ともズレを生じていない。また、負荷軸角速度の応答も1 モータ駆動と比してノーバックラッシュ駆動ではより正弦波に近い。電流については1 モータ駆動の最大電流は0.7A (モータ定格の12%) であった。トルククロスオーバー無ノーバックラッシュ駆動の駆動側モータの最大電流は2.5A (モータ定格の43%)、その時の従動側モータの電流は0.9A (モータ定格の15%) で、2 台の最大消費電流は3.4A (モータ定格の58%) となった。負荷と駆動側モータ自身を駆動するための最大電流は1 モータ駆動の結果より0.7A (モータ定格の12%)、オフセットトルク発生に必要な電流は2 台で1.8A (モータ定格の30%) なので合わせて2.5A (モータ定格の42%) となる。2 台の最大消費電流3.4A (モータ定格の58%) からこの2.5A (モータ定格の42%) を差し引いた残り0.9A (モータ定格の16%) は主動側モータが従動側モータを出力軸から逆転駆動するために必要な電流であり、オフセットトルク発生に必要な電流とともに消費電流増加の原因となっている。

トルククロスオーバー有ノーバックラッシュ駆動の駆動側モータの最大電流は1.4A (モータ定格の24%)、その時の従動側モータの電流は0.1A (モータ定格の2%) で、2 台で1.5A (モータ定格の26%) となった。よって、トルククロスオーバーを導入することでノーバックラッシュ駆動を維持しながら、消費電流は3.4A から1.5A へと半分以下に低減できた。

5. 結論

- (1) 本ノーバックラッシュ駆動制御システムは、駆動制御系の一次共振振動に起因するバックラッシュを生じやすい。その対策として、正転及び逆転モータへの電流指令にその振動をカットするノッチフィルタを挿入した。これにより一次共振振動及びその2分の1の周波数を有する外乱に対してノーバックラッシュ駆動が維持できることをシミュレーションにより検証した。一次共振振動は負荷に無関係であるので、負荷条件が変化してもノッチフィルタは初期設定のまま使用可能である。ただし、ノッチフィルタにより位相が遅れるため位置制御ゲインを下げる必要がある。
- (2) 別な対策としてノッチフィルタの逆特性を持つ逆ノッチフィルタを位置及び速度フィードバック信号に追加した。この対策によりノッチフィルタのみの場合と同様に、一次共振振動及びその2分の1の周波数を有する外乱に対してノーバックラッシュ駆動が維持できることをシミュレーションにより検証した。この対策ではノッチフィルタによる位相遅れを逆ノッチフィルタがキャンセルするので、位置制御ゲインをノッチフィルタなしの場合と同じ値を設定できた。外乱を抑制できた理由として、一次共振振動の2分の1の周波数を有する外乱は、その二次高調波をノッチフィルタにより抑制、また、一次共振振動を有する外乱は整流機能

により抑制されたためである。ただし、水勾配が著しい路面などを走行させる場合は、駆動側モータと従動側モータが切り替わらず効果はない。

- (3) ノーバックラッシュ駆動制御システムでは従動側モータも駆動側モータが駆動する必要があったが、駆動側モータのトルク目標値の一部を従動側モータに与えて従動側モータのオフセットトルクを減らすトルククロスオーバーを導入することでノーバックラッシュ駆動を維持しながら、消費電流を 3.4A から 1.5A へと半分以下に低減できることを実験で検証した。

今後、バックラッシュ発生の有無と駆動側と負荷の慣性比、オフセットトルク、外乱トルクとの詳細な関係について検討を進めて行く。

文 献

- (1) Sebastian, T., Mike M., Hendrik D., David S., Andrei A., James D., Philip F., John G., Morgan H., Gabriel H., Kenny L., Celia O., Mark P., Vaughan P., Pascal S., Sven S., Cedric D., Lars-Erik J., Christian K., Charles M., Carlo R.I., Joe van N., Eric J., Philippe A., Gary B., Bob D., Scott E., Adrian K., Ara N., and Pamela M., "Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge", *Journal of Field Robotics*, Vol.23, No.9 (2006), pp. 661–692.
- (2) 安部正人, 自動車の運動と制御, (1992), p.230, 東京電機大学出版局.
- (3) 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.
- (4) 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中編, Vol.77, No.778(2011), pp.2280-2289.
- (5) 小川順也, 前川明寛, "無人走行車両のノーバックラッシュ操舵システムの開発", 日本機械学会東海支部第61期総会講演会講演論文集 ('12.3. 15-16') No.123-1
- (6) 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中編, Vol.78, No.791(2012), pp.2386-2395.
- (7) 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2報, 外乱応答に関する解析と実験)", 日本機械学会論文集中編, Vol.79, No.805(2013), pp.3088-3099.