

ACサーボモーターユニットNXシリーズの制御技術

古田 雅治

Control technology of the **NX** Series AC servomotor and driver package

Masaharu FURUTA

The AC servomotor can operate at high-speed rotation and high-power output, but troublesome tuning is necessary. The **NX** Series is an AC servomotor and driver package that was developed based on the concept of "Making it simple to achieve high performance". By the auto tuning function, the **NX** Series provides stable control with high response rate even in a low-rigidity mechanism and a large inertial load to which the existing servomotor cannot work well. The anti-vibration control function reduces the residual vibration only by adjusting the analog volume while confirming the behavior of the work. Furthermore, the tension control mode, that is a new feature, contributes in respect to downsizing of the equipment and reduction in costs. This article introduces those functions.

1. はじめに

近年、半導体や液晶、電子部品等の製造に代表される一般産業用機械・装置の高速化や高精度化が進み、それに伴い、モーターへの要求性能も高まっています。ACサーボモーターは、高速回転、高出力トルクで運転ができる反面、装置の機械剛性や駆動する負荷慣性モーメントの大きさに合わせて、わずらわしいチューニングが必要でした。新規開発したACサーボモーターユニットNXシリーズ⁽¹⁾は、「高性能を、簡単に」を開発コンセプトとして、表1に示すような4つの制御モードを装備し、わずらわしいチューニング無しで運転が可能です（図1参照）。

ここでは、位置制御・速度制御において安定で高応答を実現するオートチューニング機能、位置制御用に新しく開発した制振制御機能、および、新しく搭載した張力制御モードについて紹介します。



図1 NXシリーズの外観

表1 各制御モードの概要

制御モード	運転指令方式	概要
位置制御	パルス列入力	<ul style="list-style-type: none"> ・位置決め運転を行います。 ・トルク制限機能により、モーター出力トルクの最大値を任意に調整できます。 ・アブソリュートシステムにより、停電時でもモーターの現在位置データの記憶と出力ができます。 ・制振制御機能により、位置決め時に生じる機構部の残留振動を抑制することができます。
速度制御	アナログ設定（2点） デジタル設定（6点または8点）	<ul style="list-style-type: none"> ・速度制御運転を行います。 ・トルク制限機能により、モーター出力トルクの最大値を任意に調整できます。
トルク制御	アナログ設定（2点） デジタル設定（6点または8点）	<ul style="list-style-type: none"> ・トルク制御運転を行います。 ・速度制限機能により、トルク制御運転中のモーター回転速度を制限できます。
張力制御	アナログ設定（2点） デジタル設定（6点または8点）	<ul style="list-style-type: none"> ・張力制御運転（張力一定制御）を行います。

2. オートチューニング

ACサーボモーターの応答性や安定性は、負荷慣性モーメントの大きさやその変化、装置自身の機械剛性の影響を強く受けます。そのため、従来、ベルト・プリー機構のような機械剛性の低い装置や、大慣性負荷を有する装置でACサーボモーターを使用すると、発振してしまい、チューニングに多くの時間を要する場合や、動作できない場合があります。

NXシリーズの位置制御モード・速度制御モードでは、「高性能を、簡単に」をコンセプトに、オートチューニングの技術として、アルゴリズムを見直した「負荷慣性推定」と、低剛性にも対応した「機械剛性選択機能」を用いて、これらの問題を解決しています。

2.1. 負荷慣性推定

NXシリーズの負荷慣性推定アルゴリズムは、従来の負荷慣性推定理論を見直し、推定の精度・速度・安定性の向上を図ることで、対ロータ慣性モーメント比50倍の大慣性推定と機械剛性の影響を削減することを実現しました。

推定の様子を見るために、負荷慣性の変化を想定した運転を行いました。まず、モーター軸に負荷を付けていない状態で運転し、負荷慣性推定値を0倍にした後、ロータ軸への直接接続（直結）で対ロータ慣性モーメント比（以下、負荷慣性比）30倍、50倍、ベルト・プリー機構（図2参照）を介して30倍（ただしベルト・プリー自身の負荷慣性8倍があるため計38倍）の負荷慣性を取り付け、運転しました。この負荷慣性推定結果と検出速度波形を図3に示します。

図3 (a) ~ (c) の3条件の評価結果より、負荷が大慣性となる場合や、ベルト・プリー機構のような低剛性な場合でも、早く正確な推定結果が得られることがわかります。また、検出速度の波形が乱れていないことより、負荷慣性推定中でも安定した動作ができることもわかります。なお、図3 (b)、(c) に負荷慣性推定値に初期値があるのは、負荷を取り付けた段階で、慣性推定がすでに動作しているためです。

負荷慣性推定値は、別売のデータ設定器（OPX-2A）、または、データ設定ソフト（MEXE02）を用いることで、常時、確認できます。

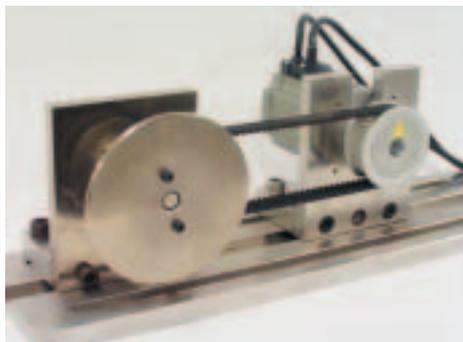
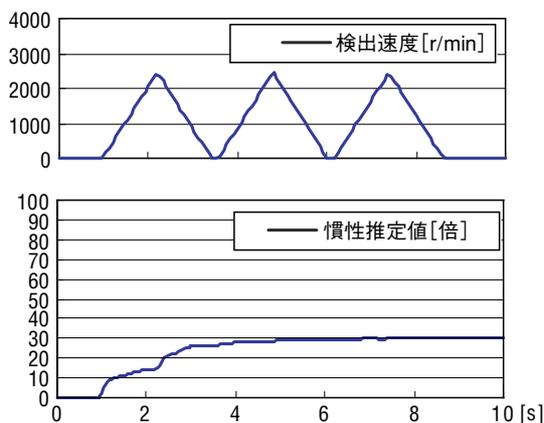
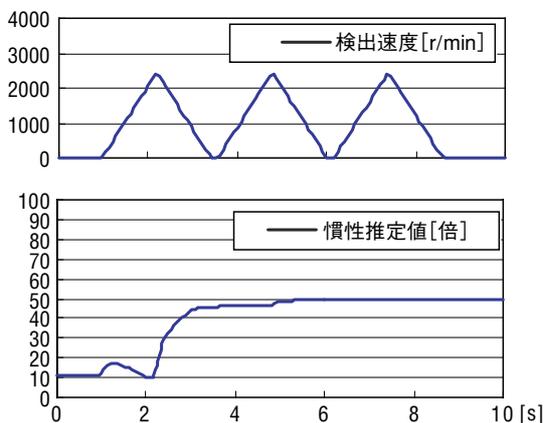


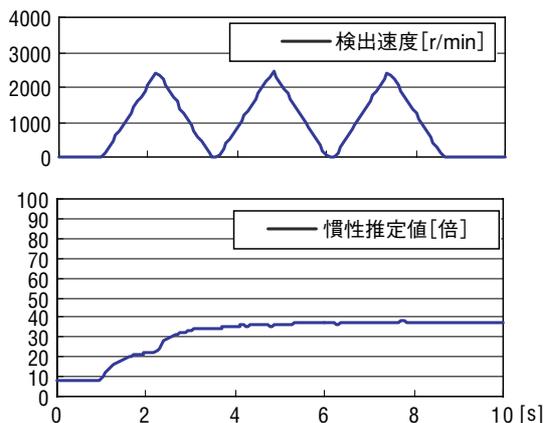
図2 負荷慣性推定 評価装置（ベルト・プリー機構）



(a) 慣性比30倍（直結）



(b) 慣性比50倍（直結）



(c) 慣性比38倍（ベルト・プリー機構）

図3 負荷慣性推定

2.2. 機械剛性選択機能

従来のACサーボモーターは、慣性の大きさに関わらず、ベルト・プーリ機構のような機械剛性が低い装置では、モーター軸側と負荷側でねじりが生じることでモーターと負荷が互いに発振してしまい、安定した動作が難しいという欠点がありました。NXシリーズでは、機械剛性選択機能により、スイッチで16段階の設定から選ぶだけで、低剛性機構でも安定して動作しながら高い応答性を得ることができます。

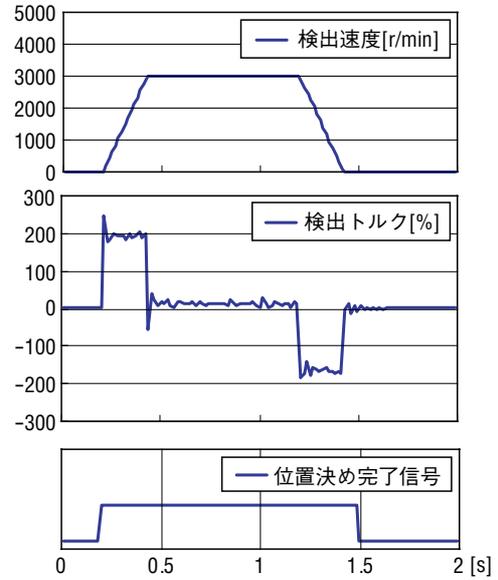
この機械剛性選択機能は、機械剛性選択スイッチ(SW2)、または、機械剛性選択パラメータ[APP-0-02]で16段階に設定できます。また、オート/セミオートチューニングモードのときは各制御ゲインも連動で機械剛性選択設定に従い自動設定されます。マニュアルチューニングモードでは各制御ゲインと独立して設定できます。

2.3. オートチューニングによる大慣性・低剛性機構駆動

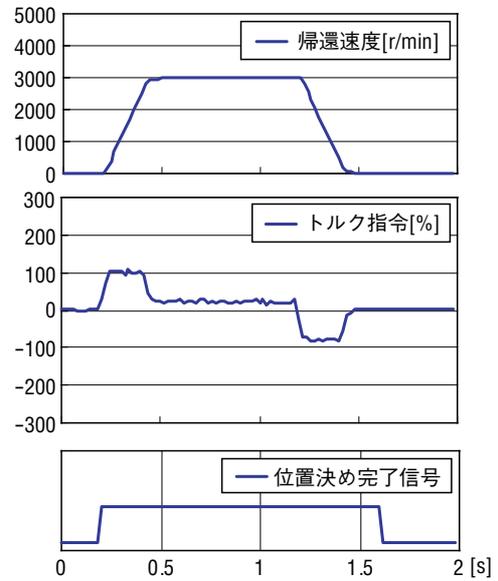
負荷慣性推定と低剛性対応の機械剛性選択機能により、NXシリーズは、従来のACサーボモーターでは苦手であった大慣性負荷とベルト・プーリなどの低剛性機構の組み合わせでも、安定かつ高応答を得ることができます。

NXシリーズと従来品(DXシリーズ)に、それぞれのオートチューニング時の許容慣性をつけ、同じ台形位置決め運転をした結果を、図4(a)、(b)に示します。機構は図2に示したベルト・プーリ機構を使用しました。図4(a)は、NXシリーズに、NXモーターロータ慣性に対し負荷慣性比50倍となる負荷をつけ、設定は出荷時設定のままとした状態の台形位置決め運転結果です。図4(b)は、従来品(DXシリーズ)に、DXモーターロータ慣性に対し負荷慣性比30倍となる負荷をつけ、NXシリーズの出荷時設定(チューニングモード: オートチューニング、機械剛性選択: 6)と同じ応答設定(チューニング方式: オート(低剛性)、動作時速度応答: 82Hz)とした状態の台形位置決め運転結果です。

図4(a)と(b)を比較すると、同じ応答性設定で、NXシリーズの負荷慣性の方が約2倍大きいにも拘らず、位置決め時間が0.1秒以上短いことがわかります。ここで、検出トルク(従来品ではトルク指令)がNXシリーズの方が大きいのは、約2倍大きい負荷慣性で同じ運転プロファイルを動作させているためです。また、3000r/minで運転中の検出速度(従来品では帰還速度)を拡大したものを図5に示します。この波形から、NXシリーズの方が、動作が安定していることもわかります。



(a) NXシリーズ (慣性比50倍: 慣性 $8.1 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$)



(b) 従来品 (慣性比30倍: 慣性 $4.1 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$)

図4 応答性比較

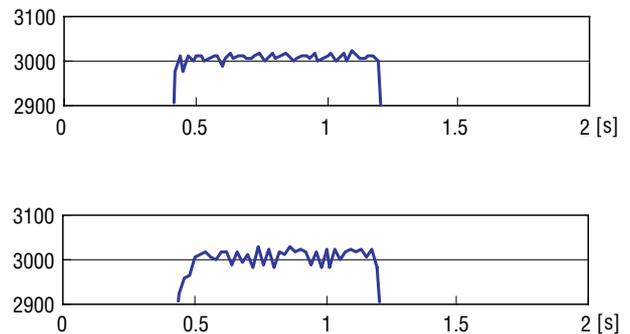


図5 3000[r/min]付近拡大 NX(上)、従来品(下)

3. 制振制御

機械剛性が低い装置での位置決め運転では、ワーク（負荷）側に残留振動が発生する場合があります。この残留振動を軽減・除去するのが制振制御です。

3.1. 制振制御の簡単な原理

急激に動作させた場合にはワークに残留振動が発生し、ゆっくりと滑らかに動作させた場合には、同じワークでも振動が発生しないことはよくあります。この点に着目したのが当社のコントローラに実装しているジャークリミットコントロール機能でした。このとき発生する振動は、急激な動作の場合にはその動作自身にワークの固有振動成分が入っているため起き、ゆっくりと動作させた場合にはその固有振動成分が少ないため起きないと考えることができます。つまり、急激な動作でも、その動作に固有振動成分が入っていない場合、振動は起きないと考えることができます。この考え方を実現した機能がNXシリーズの制振制御です。

NXシリーズの制振制御機能を有効にすると、入力したパルス列信号による位置指令を計算する部分とモーターを位置制御する部分の間に、制振制御ブロックが入る状態に切り替わります（図6参照）。制振制御ブロックは、ワークの動作にその固有振動成分が含まれないように位置指令の形状を変化させます。この固有振動成分は制振制御周波数として設定できます。ここで、制振制御ブロックにより位置指令の形状が変化しても、入力した総パルス量に対し移動量が変わるようなことはありません。

このように、ある周波数成分を抑制または除去するものとしてノッチフィルタが一般的に有名です。そして、もちろん、ノッチフィルタを使用してもワークの残留振動を除去できます。しかし、この場合、応答が著しく遅くなる可能性があります。NXシリーズの制振制御はこのようなフィルタと違い、残留振動の除去を行っても大きく応答が遅れることはありません。

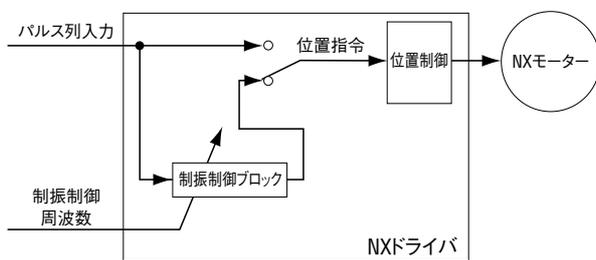


図6 制振制御ブロックの有効化

3.2. 機能・設定方法

NXシリーズの制振制御はドライバ前面にあるアナログボリューム（内部設定器（VR1））で、図7のように無効/有効の切り替えと有効時に制振制御周波数を30Hz～7Hzに設定できます。

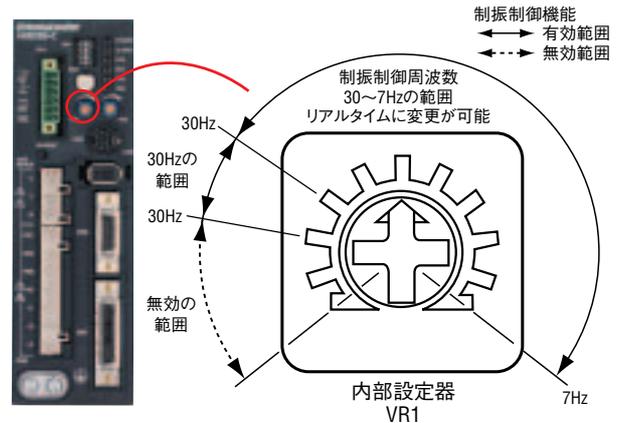


図7 内部設定器による制振制御周波数設定

この制振制御周波数は、ドライバ前面の内部設定器（VR1）を使うことでリアルタイムに変更可能です。そのため、ワークの挙動を確認しながら、残留振動を除去できる制振制御周波数を見つけることができます。また、別売のデータ設定ソフトを用いれば、このとき設定されている制振制御周波数をモニタリングできます。

また、データ設定器やデータ設定ソフトを用いて、デジタル設定で7.00Hz～100.00Hzに設定することもできます。

動作させるワークの条件（剛性・質量等）が変わる場合、動作ごとに制振制御周波数を複数切り替える必要があります。NXシリーズはこの制振制御周波数を運転データNo.0～3に最大4点デジタル設定できます。アナログ入力信号パラメータ[SyS-1-05]を変更することで、表2に示すように、制振制御周波数の設定方法をアナログ設定・デジタル設定3点とデジタル設定4点で切り替えることができます。

表2 運転データによる制振制御周波数設定

アナログ入力信号パラメータ [SyS-1-05]	有効 (出荷時設定)	無効
運転データ No.0	内部設定器 VR1 によるアナログ設定 (無効/有効: 30~7Hz)	デジタル設定 0 (7.00~100.00Hz)
運転データ No.1	デジタル設定 1 (7.00~100.00Hz)	デジタル設定 1 (7.00~100.00Hz)
運転データ No.2	デジタル設定 2 (7.00~100.00Hz)	デジタル設定 2 (7.00~100.00Hz)
運転データ No.3	デジタル設定 3 (7.00~100.00Hz)	デジタル設定 3 (7.00~100.00Hz)

アナログ入力信号パラメータ[SyS-1-05]を有効（出荷時設定）とした場合、運転データNo.0がドライバ前面の内部設定器（VR1）によるアナログ設定の周波数となります。この場合、内部設定器を反時計方向に一杯まで回すことで制振制御を無効にできますので、I/O信号によって運転データNo.を切り替えることで、制振制御周波数だけでなく制振制御機能の有効（運転データNo.1～3）と無効（運転データNo.0）を切り替えることもできます。ただし、周波数の切り替えはリアルタイムで有効ですが、有効/無効の切り替えは位置決め完了信号が出ているときのみ有効です。

アナログ入力信号パラメータ[SyS-1-05]を無効とした場合、I/O信号による運転データNo.の切り替えで、そのまま4種の制振制御周波数をリアルタイムに切り替えることができます。

3.3. 内部設定器（VR1）による制振制御動作例

RENGA No.169号（P.15～16）では、データ設定ソフトを用いて、振動を計測し、デジタル設定にて残留振動を除去した例を紹介しました。その評価結果を図8、図9に示します。今回は、実際にワークの動作を目視で確認しながら内部設定器（VR1）を調整してアナログ設定した例を紹介します。

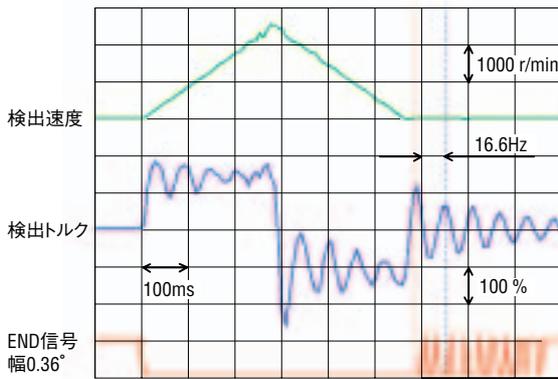


図8 制振制御無効での応答波形

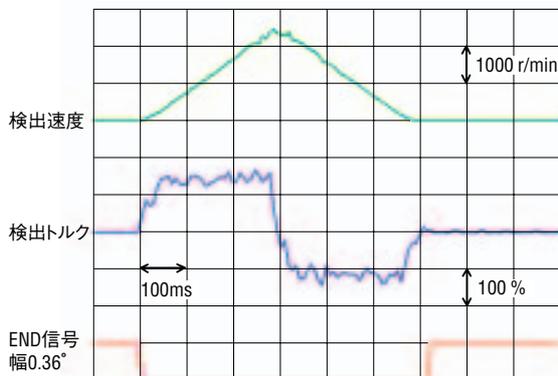


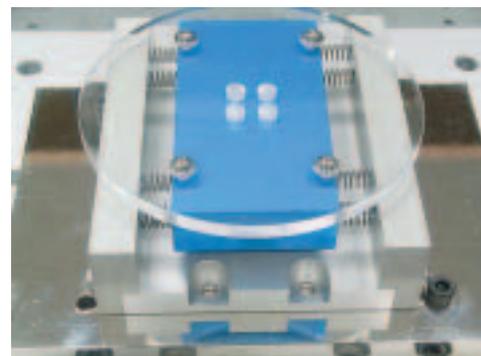
図9 制振制御調整後の応答波形

剛性の低い機構での動作を模擬する装置を図10に示します。この装置は、NXシリーズをボールねじスライダにつけ、そのスライダテーブル上にばねではさんだ金属ブロックを取り付けたものです。金属ブロックの下には、小型スライダが付いており、左右方向に自由に動くことができます（図11）。また金属ブロックの上にはアクリル円板が付いており、ここにレーザー測長器のレーザーを当てることで実際の位置と振動を計測することができます。



スライダテーブル上のワーク質量	5.5 [kg]
ワークとスライダ含めた負荷慣性比	6.3 [倍]
スライダリード	20 [mm]
スライダストローク	600 [mm]

図10 制振制御 評価装置



青い金属ブロック：下にスライダがあり
左右方向に移動可能

図11 スライダテーブル上の制振対象

制振制御周波数の設定は、レーザ測長器による結果を見ずに、実際のブロックの動きのみ確認できる状態で、アナログ設定にて行いました。この評価の制振制御周波数調整は1分以内で可能でした。これはアナログ設定可能というNXシリーズの強みが出た結果です。評価結果となるモーター速度、検出トルク、位置決め時間、そしてレーザ測長器によるワークの位置を、制振制御無効状態を図12に、制振制御調整後を図13に示します。

図14、図15に、この評価の位置決め完了後の実際の動作写真を示します（動きをわかりやすくするために直径25mmの青丸のシールを貼り付けました）。

図12、図13のワーク位置の波形データからも、また、図14、図15の実際の動作写真からも残留振動が起きていないことがわかります。

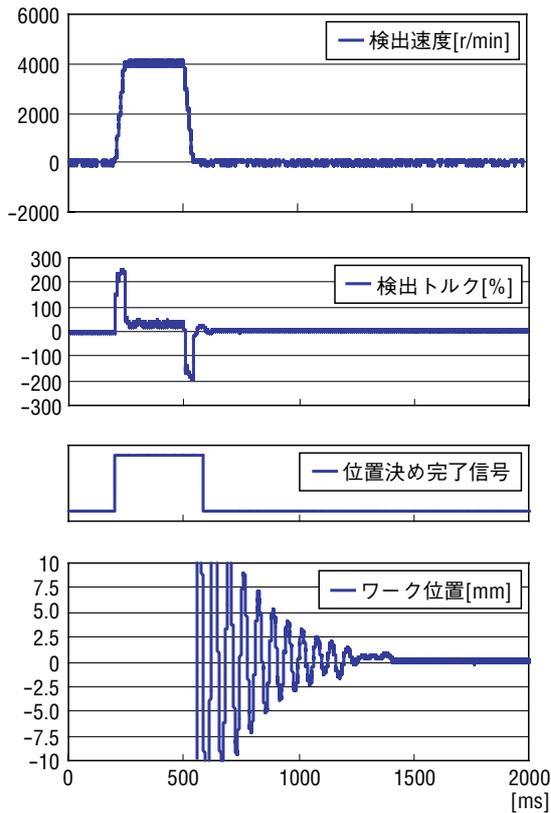


図12 制振制御無効での応答波形

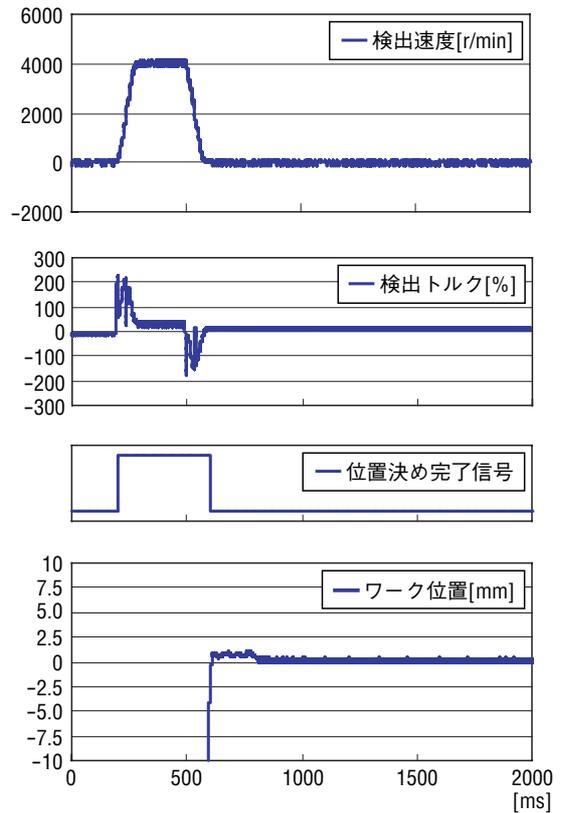


図13 制振制御調整後の応答波形

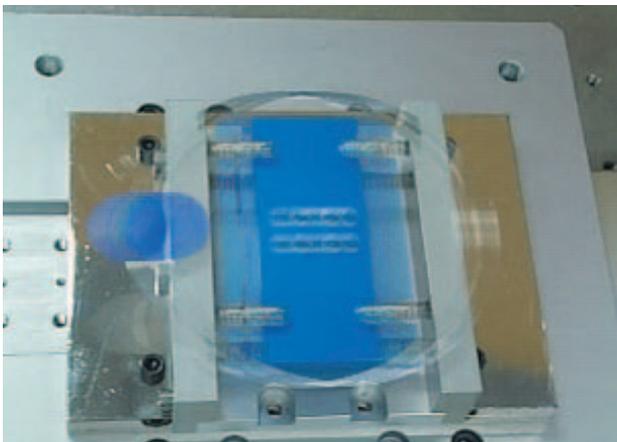


図14 位置決め完了後の金属ブロックの挙動
(制振制御無効)



図15 位置決め完了後の金属ブロックの挙動
(制振制御調整後)

4. 張力制御モード

ロール状のフィルムや紙などを巻き取る場合や巻き出す場合、巻き始めと巻き終わりでは巻径が変わります。そのため、一定張力での巻き取り・巻き出しには、巻径に合わせて、モーターの発生トルクを調整する必要があります。従来、張力制御を行うには、線速（材料の送り速度）が一定の場合はACモーターの一種であるトルクモーターを用いてその垂下特性を利用して実現できましたが、より精度の高い張力制御にはダンサローラ機構による張力検出やテンションコントローラが必要でした。NXシリーズは、自身の回転量・回転速度・負荷の各検出値を用いた張力制御専用の制御モードを持ち、また、精度の高いトルク制御を行えるため、ダンサローラ機構やテンションコントローラなどの他の制御機器を使わずに、張力制御（一定張力運転）が可能です。

4.1. 運転モード

張力制御には簡易、高機能Ⅰ、高機能Ⅱの3種類のモードがあります。製品出荷時はデータ設定器やデータ設定ソフトなしで動作できる簡易モードとなっています。データ設定器やデータ設定ソフトを用いることでより張力制御性能の高い高機能モードⅠ・高機能モードⅡに設定できます。張力制御の運転モードを表3に、設定可能項目を表4に示します。

表3 張力制御モードの運転モード

モード	内容
簡易 (出荷時状態)	線速が一定の時に一定の張力となる制御をします。モーターの回転速度とトルクは反比例します。
高機能Ⅰ	材料厚、初期径、および最終径をもとに、現在の巻き取り（巻き出し）径を自動で計算します。運転速度に関係なく、一定の張力となるように制御します。
高機能Ⅱ	高機能Ⅰの内容に加え、材料慣性モーメントと芯金慣性モーメントから、負荷慣性モーメントも計算します。加減速時でも一定の張力となるように制御します。

表4 張力制御モードの設定項目

設定項目	モード		
	簡易	高機能Ⅰ	高機能Ⅱ
張力指令値	●	●	●
材料厚	—	●	●
初期径	—	●	●
最終径	—	●	●
材料慣性モーメント	—	—	●
芯金慣性モーメント	—	—	●
テーバー設定	—	●	●
速度制限	●	●	●
摩擦トルク補正	—	●	●
張力制御減速比	—	●	●
最低速度	●	—	—

4.2. 簡易モード

簡易モードは、材料の線速が一定のときに張力が一定となる張力制御です。動作に必要な設定は、張力指令値と最低速度、そして速度制限です。これらの値は、データ設定器やデータ設定ソフトがなくとも設定でき、ドライバの前面スイッチ (SW2) による最低速度設定 (表5参照) と、アナログI/O入力または内部設定器 (VR1、VR2)、I/O入力のみで動作させることができます。

簡易モードは、張力一定とするための制御をモーター軸の検出速度から出力トルクを制御することで行います (図16参照)。発生させたい張力を F 、モーターが出力するトルクを T 、モーター軸検出速度を ω_r 、巻き取り動作などで変化する半径を R 、線速を $V\ell$ とすると、

力のモーメントより

$$F = \frac{T}{R} \dots\dots\dots (1)$$

角速度の関係より

$$V\ell = \omega_r \times R \dots\dots\dots (2)$$

式(2)を半径 R について解き、式(1)に代入すると

$$F = \frac{\omega_r \times T}{V\ell} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)より、張力 F を一定にするには、線速 $V\ell$ 一定の条件下において、モーター軸の検出速度に反比例したトルクを出力すればよいことになります。ただしこの場合ですと、停止時や線速が低くなったとき、張力が上がってしまいますので、NXシリーズは最低速度設定で出力トルクを制限できるようになっています。また、動作中、何らかの不具合で張力制御対象が切れた場合などは、モーター速度が急激に上がってしまいます。その対策として、速度制限設定ができます。

表5 最低速度設定

SW2の目盛り	最低速度 [r/min]	SW2の目盛り	最低速度 [r/min]
0	10	8	220
1	15	9	330
2	22	A	470
3	33	B	680
4	47	C	1000
5	68	D	1500
6	100	E	2200
7	150	F	3000

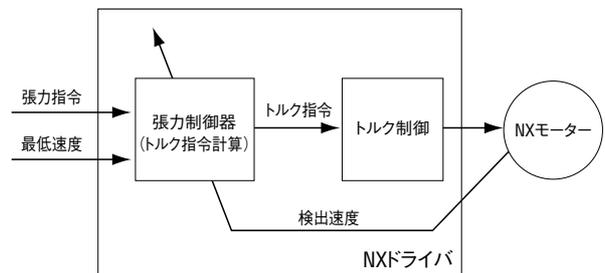


図16 張力制御 簡易モード

モーターの検出した速度に対する出力トルクを表す回転速度-トルク特性を図17と図18に示します。

図17は、最低速度設定を470r/minに設定し張力指令を変更したとき、図18は張力指令を50%に設定し最低速度設定を変更したときの特性図です。回転速度は、正方向は巻き取り方向の回転、負方向は巻き出し方向の回転を示します。アナログ入力時の張力指令と速度制限はリアルタイムに変更可能で、デジタル設定時は運転停止時に変更可能となります。最低速度設定は常に運転停止時のみ変更可能です。

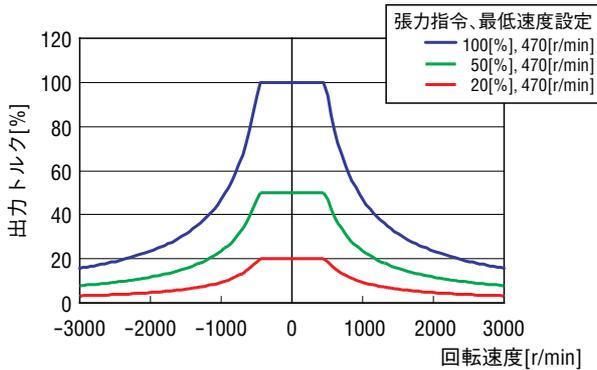


図17 回転速度-トルク特性 (最低速度設定一定)

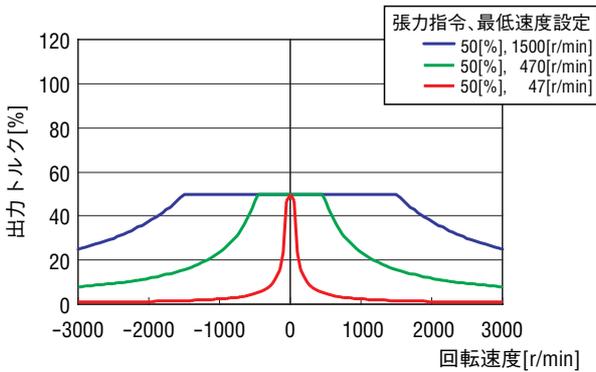


図18 回転速度-トルク特性 (張力指令一定)

4.3. 高機能モード I

高機能モード I は、簡易モードが検出速度にしたがって出力トルクを制御していたのに対し、回転量にしたがって出力トルクを制御します。

式(1)より、半径 R の情報を取得しそれに従いトルク出力を制御することで、張力 F を一定に制御できます。高機能モード I では、この半径 R を、デジタル設定された材料厚・初期径・最終径と運転時の回転量より自動で計算します(図19参照)。そのため、これらの値を別売のデータ設定器やデータ設定ソフトを用いて、設定しておく必要があります。

高機能モード I は、その出力トルク計算に検出速度を用いていないので、線速に関係なく張力を一定とすることができ、停止時でも張力が上がることはありません。

また、巻径が増加するにしたがって張力を低下させる

ことで巻き絞りを防止できるテーパ設定や、摩擦トルク補正設定、モーターと負荷の間に減速機構がある場合の張力制御減速比設定の機能も持っています。

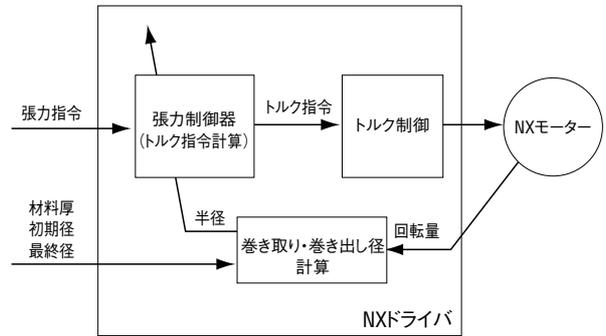


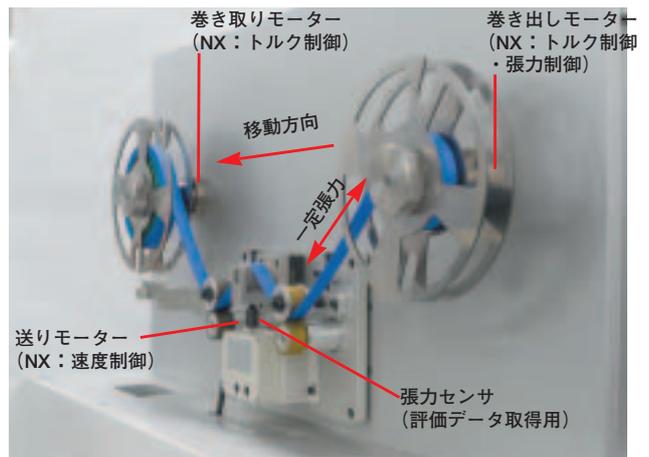
図19 張力制御 高機能モード I

4.4. 高機能モード II

高機能モード II は、高機能モード I の設定に加え、材料慣性モーメントと芯金慣性モーメントも設定することで、加減速時(線速変化の過渡時)でも一定の張力となるよう制御します。

4.5. 実際の動作波形

図20に示す張力評価装置を用い、トルク制御、張力制御簡易モード、張力制御高機能モード I で動作させたときの張力波形を、図21、図22に示します。



張力制御対象：化繊リボン

材料厚：223[μ m]

初期径：96 [mm]

最終径：60 [mm] (巻き出し運転)

張力：高機能モード I で張力指令値40[%]となる張力で評価

制御モード：トルク制御

張力制御 簡易モード

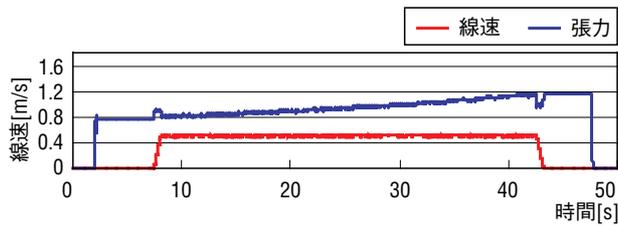
張力制御 高機能モード

線速：(一定速) 0.5[m/s]

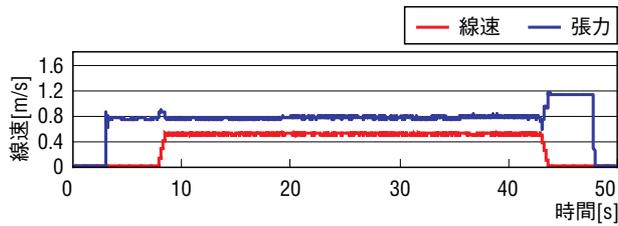
(可変速) 低速時0.2[m/s]、高速時1.5[m/s]

図20 張力制御 評価装置

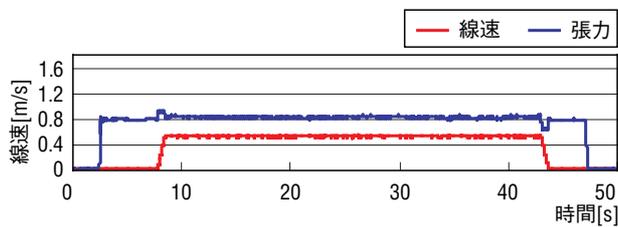
トルク制御に比べて、張力制御簡易モードでは運転中の張力が一定、張力制御高機能モードⅠでは停止時も合わせて張力が一定であることがわかります。



(a) トルク制御



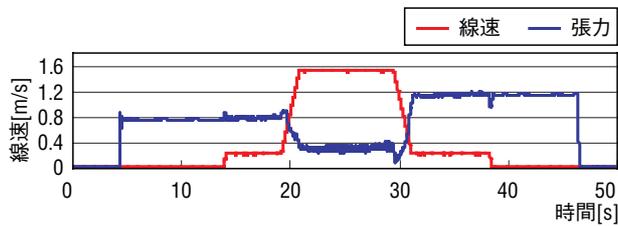
(b) 張力制御 簡易モード



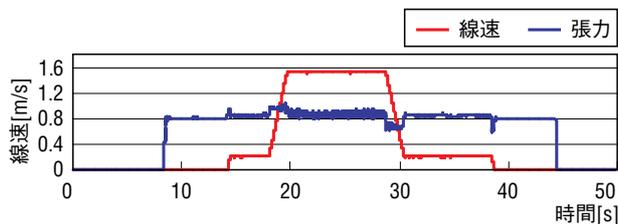
(c) 張力制御 高機能モードⅠ

図21 張力制御評価

また、簡易モードでは運転中線速を変えるとそれに反比例して張力が変わるのに対し、高機能モードⅠでは、線速変化の過渡時には張力が乱れるものの、異なる速度でも一定の張力で制御できることがわかります。



(a) 張力制御 簡易モード



(b) 張力制御 高機能モードⅠ

図22 運転中変速したときの張力制御評価

さらに、この線速変化の過渡時の乱れは、高機能モードⅡにて軽減させることも可能です。図23に加減速度を上げて線速を切り替えたときの高機能モードⅠと高機能モードⅡの線速と張力の波形を示します。高機能モードⅡの方がⅠに比べ約半分の張力変化で済んでいることがわかります。

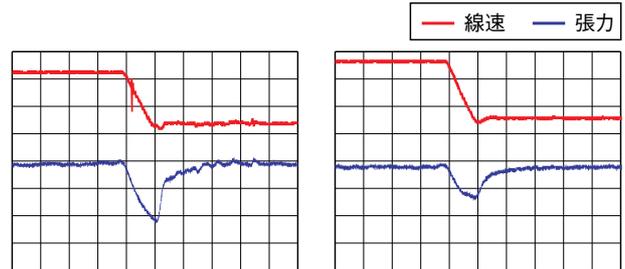


図23 線速変更時の張力の乱れ 高機能モードⅠ (左) 高機能モードⅡ (右)

5. まとめ

NXシリーズは「高性能を、簡単に」をコンセプトに開発しました。従来のACサーボモーターでは苦手であった大慣性負荷とベルト・プーリなどの低剛性機構との組み合わせでも、そのオートチューニング機能により、安定かつ高応答を得ることができます。また、残留振動が発生してしまうようなワークや運転プロファイルでも、制振制御機能でワークの挙動を確認しながら、アナログボリューム（内部設定器（VR1））を調整するだけで簡単に振動を低減出来ます。さらに、新機能である張力制御モードの搭載により、装置の小型化やコストダウンという面で、お客様の装置に貢献できると考えます。これからも「高性能を、簡単に」をコンセプトに更なる機能の充実に向けて参ります。

参考文献

- (1) 五十嵐 淳, 「チューニングレスACサーボモーターユニット NXシリーズの開発」, RENA, No.169, (2007), p13-21

筆者



古田 雅治

VEXTA事業部 土浦オフィス 制御技術部
ソフトウェア技術課
博士 (工学)