

## 高速サーボ機械実現のための一手法

### 副題 制振制御と実用化のためのプロセス（問題点）

- 1 はじめに
- 2 制振制御とは
- 3 実用化プロセス

#### 1 はじめに

最近、半導体周辺機（マウンター、IC テスタ etc.）業界から X-Y-Z 直交 3 軸系に用いられるサーボシステムの高速化によるタクトタイムの短縮要求が強く求められております。サーボエンジニアリングを主業務といたします弊社では、この問題を解決するためには、サーボ（電気）とマシン（機械）を一体として捉えた上で、不都合な現象の技術的背景を解明する必要がある、として新技術の開発を行ってまいりました。

この度、高速化を妨げている要因の一つとして、マシン構成上、必ず存在する駆動機構部のクリアランスの影響が大きいことをつきとめ、実際の機械にて大きな効果（高速化）が得られましたので、誌上を御借りいたしまして、発表させていただきます。

この制振制御技術により、従来「経験と勘」のしめる割合が比較的大きかったサーボシステムの高速駆動領域を「技術」として捉え、目的とする所要位置付け時間を得るためには、サーボモータをどのように駆動するべきか、そして、駆動される機械側の設計をどのようにすべきか、が明確に解明出来たと考えております。

#### 2 制振制御とは

ショートピッチでの高速位置決めを行う場合、S 字加減速は適さず、三角駆動を行うと、整定時の残留振動が大きく、結果、加速度を下げるか、残留振動の収まるまで待ち時間を設けるか、いずれにしても、位置付け整定時間を要求値より長い、ある値で妥協しなければならないといった経験をされた方が多くおられるものと思います。またこの残留振動の周波数が比較的低い事も経験値としてお持ちのことと思います。

今回、弊社では図 1 のような直交 2 軸のサーボシステムにおいて、「なぜ、サーボモータの加速・減速に S 字加減速カーブが広く用いられているのか？」という点に着目して理論考察、及び実験を行った結果、第一軸（X 軸）のモータ出力シャフトに直結されているボールネジ以降の摺動部に必然的に存在する機械的隙間（クリアランス）が等価バネの働きをしている事をつきとめました。つまり、直交 2 軸系のシステムはバネの先に付いた負荷を制御するモデルであり、そのバネの振動をおさえるために、緩やかに加速・減速を行う必要があり、そのために経験的に S 字加減速が用いられてきていることが理解できました。

図 1 を等価ブロックを用いて表すと図 2 のようになります。図 2 のようなバネ－質量（マス）系を持つ負荷を直線加減速した場合、その質量の実速度はサーボモータへ

の指令速度にバネの固有振動周波数成分が加算されたものとなります。その様子を図3に示します。この振動を伴った質量の実速度はある定まった周期（ $T$ とする）毎に指令速度と一致する定常振動を行います。この一致点におけるバネの状態は、何も外力の加わらない初期状態に戻っていることとなります。この時点でバネに加える外力（加速度）を零にしてやると、それ以後、振動を伴わない一定速度での走行が行われ、減速状態にあるときは、それ以後振動を伴わない一定速度での走行（速度 = 零、停止）が可能となります。従って、残留振動を伴わないで負荷の質量を整定（停止）させることが出来ます。

この制御を用いると、サーボモータで駆動される機械の限界（摺動部のクリアランスの大小により決まる）までの高速駆動が可能となります。別な表現をすれば、従来「経験と勘」のしめる割合が比較的大きかったサーボモータの高速駆動を「技術」として捉えられ、目的とする所要位置付け時間を得るためには、駆動される機械側の設計をどのようにすべきかが明確に出来たと考えております。

### 3 実用化プロセス

#### (1) 固有値の計測

初めに、この制御法を適用する実機を用いて高速位置付け動作を繰り返し行い、各位置付け整定波形（残留振動を含む）を計測します。移動距離、移動開始点を変え、実機動作で使用される諸条件を入力し、テストする必要があります。通常 $X - Y$ 平面は非線形平面と考えられるために領域を分割することによる線形化が必要になる場合があります。同一駆動条件で複数回駆動をおこなった時、この得られたデータの状態により次からのステップが大きく分かります。

##### ケースA

各波形がほぼ同一と見なせる整定時振動波形が得られる場合、明確な固有値が得られたことになり、この固有値の周期 $T$ が、モータの加減速区間と等しくなるように三角駆動、または、台形波駆動の速度指令カーブを決定します。つまり、この場合は即、制振制御が適用可能になります。

##### ケースB

各波形が同一とならず、整定時波形がバラツク場合、この場合は機械系の条件が駆動毎に変動しており、何らかの機械系への対策を行った上で、制振制御を適用することになります。

機械系の変更なしでモータの出力容量だけを増加させ、位置付けタクト時間を短縮するトライを行なった時、等に良く見られる現象です。

#### (2) 「ケースB」の場合の対応について

この場合も対応方法は大きく分けて2つあります。

#### 対応 1

整定時波形が乱れないようになるまで、加減速条件を緩めてみます。必然的に位置付け時間は大きくなります。時間性能を無視するならどのような機械でもこの状態は作りだせます。この現象はサーボと機械の関係を考える上で大変示唆に富んだことを含んでいると思います。つまり単純に良い機械、悪い機械というものは存在せず、ある時間性能を得るために適した条件を機械が備えているかどうか、ということであり、言い替えれば、サーボシステムの性能は、運動エネルギーと機械剛性の問題に帰着すると考えられます。

#### 対応 2

機械側に何らかの対策を施した上で位置付け時間の短縮を実現します。

#### (3) 「ケースB」, 「対応2」の場合

典型的な良く経験する事例を紹介し、その対応方法を説明させていただきます。

1) 機械が設置されている床が弱く、常に機械が何らかの振動を受けて揺すられている場合。この場合床振動の影響をあるレベルまで押さえる必要があり、その方法としては

床強度をアップする

床振動の遮断：遮断目的の防振材を使用するか、機械自重で押さえ込む手法

設置場所の選択

等が考えられますが、費用対効果を考慮して選択することになります。

2) 機械のベースが、同じ条件で同じ動作をさせていても、駆動毎に変形し、かつ、その変形度合いが微妙に変化している場合。例を上げれば、アルミの構造材をボルト等で結合して寄木細工的に構成した機械ベース(筐体)を用いて不用意に運動エネルギーの大きい制御をやらせようとした場合などに良く見られます。

このような場合は

機械ベースの重量アップ、剛性アップ

鉄系構造材の溶接工法、あるいは鋳物ベースの採用を考慮してください。要は、駆動により発生する運動エネルギーの反力(反作用)を受け止められるベース(筐体)強度を設計時に考慮することが基本と考えます。可能ならボルトによる締結は極力避け、シンプルな一体構造(つまり鋳物ベース)が好ましいと言えます。

出来れば避けたいボルト締結（ベース構造にて）

サーボの高速駆動（高運動エネルギー駆動）時に機械ベース部に加わる力を加速度センサー等で観測していると、相当大きな衝撃力が加えられていることがわかります。その大きな衝撃力により、ボルトで締結されている接合面剛性が崩れ、衝撃エネルギーが大きい時は2つの個体、時間経過とともにエネルギーが減少すると1つの個体となり、極めて短い時間経過の中で、振動モデルが大幅に変化して、その結果、複雑な振動モードが生じ、対応がとれない場合が数多く存在します。

この現象は加振ハンマー等を用いた振動解析法等では、実機の実動作時と比較して、その**衝撃エネルギーが大幅に相違する**ため、なかなか原因特定が出来ず、いたずらに時間を浪費する結果にもなりかねない危険性を含んでおります。やむおえず、ボルト締結を採用する場合は、締結状態の崩れのないことを実動作において確認しておくことが賢いやり方と考えます。

出来れば避けたい天吊り構造（駆動部構造にて）

機械装置の最上部に駆動機構をもつ、天吊り構造マシンは「櫓の天辺を揺すっている」とも考えられ、揺れやすい構造のマシンの揺れを小さくする努力をはらうわけで、大変困難な作業に挑戦することになります。

ここは、発想を転換して、機械の低重心化に努め、その上で、揺れ防止対策を実施するほうが効率が高いと考えます。

### 3) ボールネジ、リニアガイド

いろいろな問題を発生させる要因を含んでおりますが、要は、製造メーカーより提示される機械強度、設置される機械の加工精度、設置（取付け）精度、組み立て方法等を守り、あくまで基本に忠実に実施することが肝要と考えます。

自動調芯タイプのリニアガイドについて

このタイプのガイドは、利便性が大変高く、広く利用されており、その果たした役割は、計り知れないものがありますが、制振制御を適用した高運動エネルギー駆動時には、クリアランスの定量化に若干の難しさがあり、アプリケーションによりタイプの使い分けが必要になる場合が存在いたします。

以上申し上げましたような点に配慮いただければ、必ず3 - 1項、「ケースA」の状態が実現でき、容易に制振制御が適用可能となり、所望のサーボ性能（タクトタイムの短縮化）が得られることとなります。図4に従来の直線加減速、S字加減速と本制振制御を用いた場合の性能比較を模式的に表してみました。

おわりに

この制御法は直交駆動系の有害な低周波領域の機械系固有値を全系モードで実測し、

得られた固有値を用いて、固有値駆動を行う、サーボモータの駆動方法であり、実機計測データを基本に置いた制御手法であるために、皆様の実機において、適用効果が見られるものと確信しております。

なお、ダイアディックシステムズではこの制振制御を実現するための、制振制御パルスジェネレータをこのたび新発売致しました。パルス列位置指令タイプの市販汎用サーボアンプのインターフェースと同一であり、一般的なパルス列位置指令出力を有するコントローラから、加減速指令なしのパルス列を制振制御パルスジェネレータへ出力することによって、制振制御に対応できますので、従来の汎用サーボアンプを使用するのと全く同じ感覚で使用でき、制振制御への対応のためにユーザのシステム全体を大幅に変更する必要はありませんので、広く御利用いただけるものと考えております。

おわりにあたりまして、この制御法を確立いたします過程で弊社にご協力いただきました皆様に誌上をお借りいたしまして感謝申し上げます。

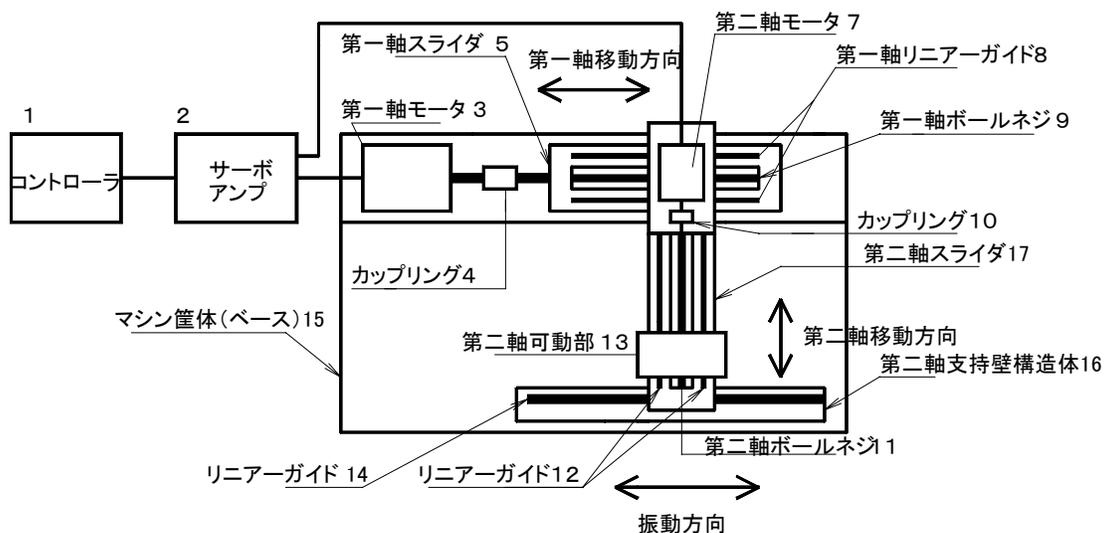


図1、直交2軸サーボシステム

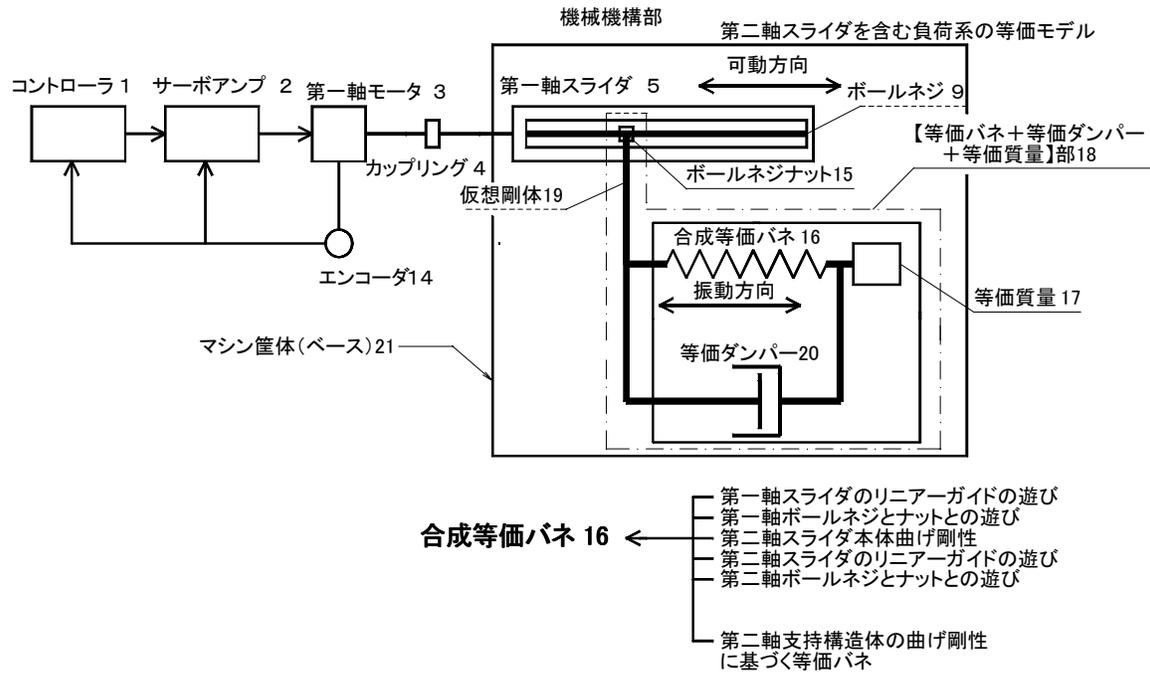


図2、直交2軸サーボシステムの等価モデル

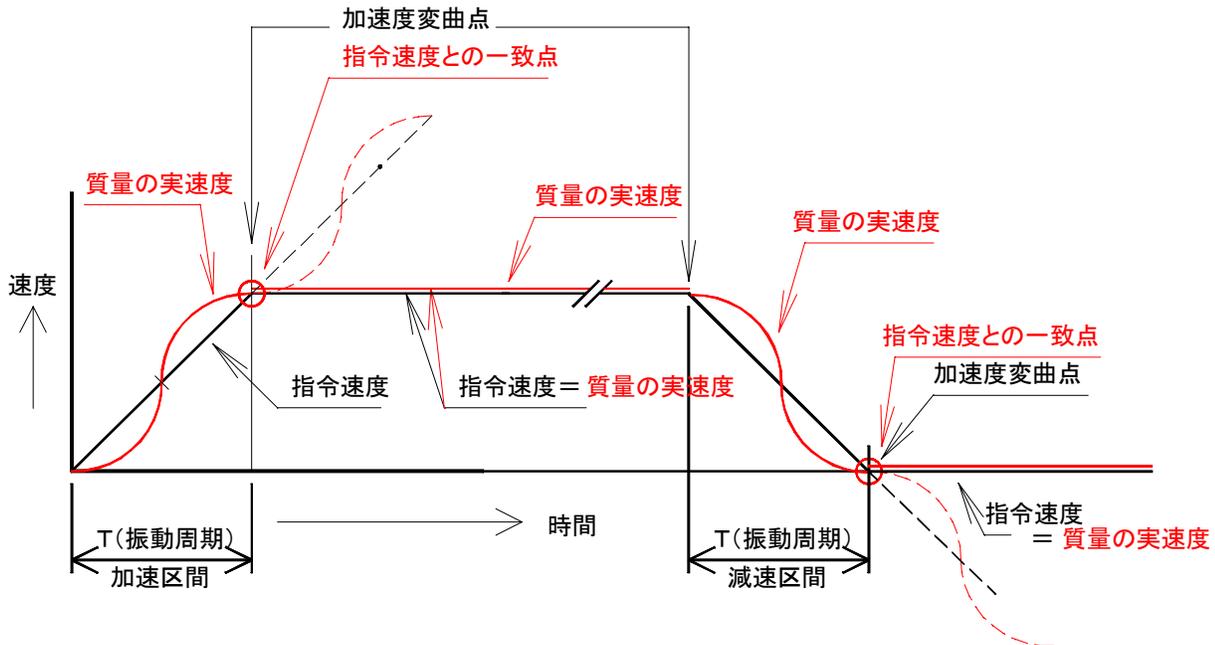


図3、質量の実速度と指令速度、及び加速度切り替えの概念図

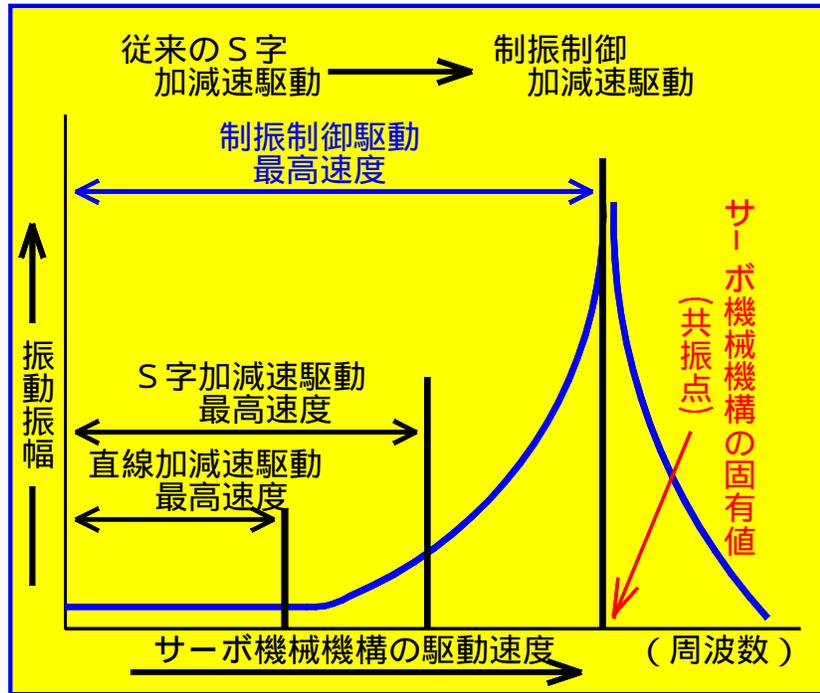


図4、直線加減速・S字加減速・制振制御の高速位置付性能比較