

最適なサーボモータ制御を実現する機械設計の手法

工業用機械の設計者やシステムインテグレータからのよくある質問は、パフォーマンスの期待に応えるためにサーボテクノロジーを使用し、機械を効率よく動かす方法とそれを効果的に設計し実装する方法についてです。これは、作業内容が完全に理解されている場合であっても、手順が複雑で実行するのが大変困難であると思われる。

さまざまなテクノロジーが新しい機械に使えるのですが、テクノロジーごとに工学的な差異があったり異なる操作手順が存在したりします。また誤解や知識のギャップがある場合やリスクなどを考慮に入れた場合など、指数関数的に可能性が広がりその選択が難しくなります。この記事の目的は、サーボモータの導入を検討した場合における設計初期段階で検討される課題の多くを解決できるようその設計手法を簡略化して提案することです。この手法は、リスク管理、最適なパフォーマンス、開発時間の短縮を目的に一般的な機械軸の構成とその要件に基づいて作成されています。

機械設計の初期段階では、多くの課題に直面します。期待に添う実現の可能性を探り、失敗のリスクを減らし、さまざまな組み合わせのシナリオを考え処理することは大変困難な作業になります。このためには、全体的な製造プロセスと個々で実行される作業に関連して機械の機能や各軸の動作など基本的な知識を得ることが不可欠です。まずは、機械の機能を把握するために、全体の製造プロセスを理解し、イン・アウトを網羅した全体像から変数やトレードオフの条件を特定しますが、まだ、未知なる部分が有る可能性が高いことを意識します。このことは、機械の各軸にて運用されるモーションテクノロジーの長所と短所にまで及びます。

潜在的な問題を事前に解決し、実装し、それが評価される機会が大幅に増えることによって深い理解を前もって獲得できます。また、設計の中心は利用可能な特定のテクノロジーのリスクを評価しそれらをどの様に取り入れるかにあり、これは、望まれるプロセスに必要な機械の機能のトレードオフ条件とその決定優先度に関連しています。

テクノロジーの詳細なレビューとさまざまなパフォーマンスの評価

ある機械における製造プロセスでハイテク性能と見なされるものが必ずしも望まれている機械の製造プロセスで高い性能が発揮されるわけではありません。機械製造業者が、多くの経験のあるテクノロジーを導入したがることは当然です。しかし、新たな課題を解決するためには、より新しいテクノロジーが必要です。改造や新しい機械設計にてクローズドループ（サーボ）によるモーション制御テクノロジーを採用する場合、誤解が伴うことがよくあります。例えば、以前のテクノロジーを利用した機械の最適化に必要とされたものと、新たな機械に望まれる性能を満たすために必要とされるものとの間で誤解が生じます。クローズドループによるモーション制御のテクノロジーを適切に導入するためには、新しい機械の性能を向上させる機能のトレードオフ条件などによってバランスを取る必要があります。

以前のテクノロジーには、油圧アクチュエータ、可変速度モータ、空気圧、または、オープンループ制御、ON-OFF制御、場合によってはセミクローズドループのテクノロジーなどがありますがこれらを否定しないでください。リスクを低減するためには、より新しいクローズドループ制御の概念であっても、古い概念とのバランスをとる必要があります。たとえば、機械のすべての軸を仮想マスタ軸で制御するテクノロジーは大幅に進化していますが、1つの軸で2つ以上のモータを駆動する場合（機構/負荷によって機械的に結合または擬似的に結合されている）、ドライブが仮想マスタコントローラを経由して他のドライブと通信する際に発生するレイテンシにより、機械が動作する速度に応じてその機能的なリスクが増加します。

一般的に、高速化が必要となるプロセスでは、品質を維持するために以前に設計された機械より応答性が良い機械が必要になります。言い換えれば、機械により速く目標に移動して作用する能力があり、かつ、全体のプロセスの限界内で全ての命令および外乱に適應する能力が必要になります。

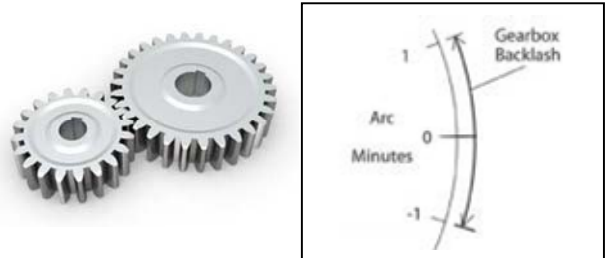
多くの場合、実際のプロセスに掛かる時間は固定で、既存のテクノロジーではこの時間を短縮することができず、唯一、搬送時間だけが時間の短縮に使えることとなります。この時間を短縮するためには、搬送軸の加速/減速中のピーク馬力 (hp) をベースラインから増加する速度とトルク比を増やす必要があります (速度とトルク、それぞれ15%増加した場合、ピーク馬力は32.25%増加します)。これに関連する問題の多くは、機械を作り直す際にオープンループやON-OFF制御、セミクローズドループ制御方式からクローズドループ制御方式に切り替えるときに発生、これは特に最初のサーボ機械を設計する者にとっては、直感的ではないかもしれません。

特定できる問題：

イナーシャ：過去、機械設計を行う上では、機械の特定の軸におけるシステムのイナーシャは懸念事項でなく、また、考慮されることもありませんが、幾つかの他の軸では大きなシステムのイナーシャ (負荷とアクチュエータ) が必要であり、これにより製品の外乱を軽減する必要がありました。今、このシステムを高性能なサーボを使用して、速度を向上させ、生産性を向上させたいと考えています。これには、過去の設計と比べ、コマンド、製品の変更や外乱を検知し、偏差 (コマンド値と実際の値の差 Δ) に対応し適切な補正が簡単に素早くできるようにするために帯域幅を考慮した応答性の高い軸が必要とされます。また、この設計を実現するには、一般的により低いシステムイナーシャが要求されます。特に連続したプロセスのポイントツーポイントの移動やオンザフライの補正を必要とするプロセスに必要とされます。また、これらの生産エネルギーコストは、生産効率レベルを上げることで減少すると考えられます。

メカニカルギア：特に以前に設計された機械で発生する問題の一つに軸の機構に組み込まれたギアで発生するバックラッシュがあります。かねてよりこの種の機構には潜在的な問題があると考えられていました。その理由は、駆動軸がギアを介して負荷を駆動するため、負荷側にギアの噛み合わせ特有の余裕 (バック

ラッシュ) が発生するためです。しかし、サーボモータによる等速補正がある環境では、バックラッシュが \pm の偏差に大きく表れます。



ギアとバックラッシュ

タイミングベルト：これまでに設計された多くの機械 (特に単方向の駆動) では、ベルトが壊れない十分なサイズである限り、ベルトによって生じるコンプライアンスの量は、通常、プロセスに関して大きな懸念事項ではありません。しかし、サーボモータによる等速補正がある環境では、ベルトのコンプライアンスの影響が \pm の変位に大きく表れます。ベルトのコンプライアンスによる影響を減らすためには、可能な範囲でベルトの幅 (単方向の駆動として計算される) を広げます。また、強度のあるベルトや厚みのあるベルトを採用することでコンプライアンスによる影響を減らすこともできます (ベルトの剛性を高める)。[注意し



ベルトと遊星ギヤヘッドによる機構

下さい！厚いベルトは、コンプライアンスによる影響を減らすことができます (望ましい) が、制御システムに依存する固有の共振周波数を下げ (望ましくない) ことから、その発見を難しくする可能性があります。また、別の問題とし

て、ベルトのサイズを大きくした場合、設計上考慮すべき側の荷重が大きくなります (ベアリング、テンション、プーリ、モータなどに影響を与える可能性があります)。

多くの設計者の方へ、これらの問題は、最初に解決しなければならぬ難しい概念を示しています。さまざまなオープンループ、ON-OFF制御や擬似クローズドループ制御などの知識の一部や全部が新しい機械設計に対する潜在的な障害となり、増産や品質などの目指す

ゴールに影響を与えます。したがって、この新しい設計手法を導入し実現するには、リスクを管理し、最適なパフォーマンスを見つけ、開発時間の短縮と言う目標を達成するために機械、電気、電子、制御、プロセスやプログラミングなど各分野に精通した機械設計者からのさらなる協力を必要とするかもしれません。

新しい設計に対する潜在的なプロセスの問題を最小限に抑える

サーボシステムテクノロジーを利用して目標を達成しようとする場合、設計者は、新しい機械の各軸における帯域幅を改善して応答性を高くする必要があります。また、タスクを達成するために摩擦負荷や外的負荷（重力による影響など）、プロセスが要求する公差内において実際に制御可能なモータに反映されるイナーシャ、各軸のバックラッシュとコンプライアンスなど幾つかの変数を考慮する必要があります。一般的なサーボメカニズムでは、コンプライアンスの影響を最小限に抑えるため剛性の高い圧着方式などによる接続が望まれます。

ダイレクトドライブを採用する軸では、モータと負荷を繋ぐシャフトやフレームなどのコンプライアンスが制限の要因になり、サーボ制御ループの最終的な帯域幅に影響を与える可能性があります。従来のテクノロジーではそれほど懸念されていなかった機械フレームのコンプライアンスであっても、軸の応答性や動作安定性、制御に対して大きな影響を与えることがあります。例えば、可能な限り軸の帯域幅を改善して、応答性、制御性を追求し、ダイレクトドライブ・カートリッジ・モータのリスクを回避するためには、被駆動軸（該当する場合）を可能な限り大きい外形寸法（OF）で、また、シャフト全体の長さをできるだけ短く設計することが非常に重要になります。（システムの応答性を高めるためには、できるだけ大きなIDのベアリングを使用してください。）

ダイレクトドライブカートリッジモータテクノロジーは、ロータをサポートするために機械側のベアリングを使用して直接取り付けることにより、従来の機械に用いられていたギヤヘッドやブリー、ベルトなどを不要とします。

Kollmorgenは、ダイレクトドライブモータテクノロジー開発のパイオニアです。

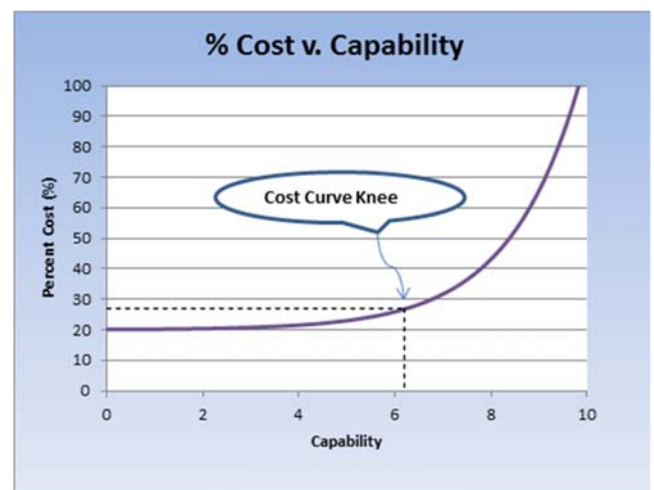


ダイレクトドライブのメカニズム

リスク管理とトレードオフの優先順位付け

リスク管理とは、新しい機械の設計時において、製品の生産に必要なプロセスで各軸が担う仕事を達成する為に必要とする機能を調整する意味合いがあります。新規設計時、特にそのコンセプトを実証する段階では、生産プロセスがまだ決定していないことから、機械に対してのコスト削減を合理的に求めることができないことを覚えていて下さい。利用可能なサーボシステムテクノロジーから各軸の仕様を決め、トレードオフを行うために最先端の機械機能と選択されたプロセスを常に維持し、機械のモーションテクノロジーとその制御を変更することは、リスクを大幅に削減し、あらゆる機械設計の成功を促進します。

選択されたプロセスにより機械の機能（イン・アウトなど安全に関わる基本的な要件）が決められた後、各軸がどの様に動きタスクを実行するかを検討し、解決する方法の質疑を開始することができます。次の一連の質問は、すべてを網羅するものではなく、サーボモータシステムを利用した機械設計アプローチを簡単にします。



グラフは、能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限を示しています

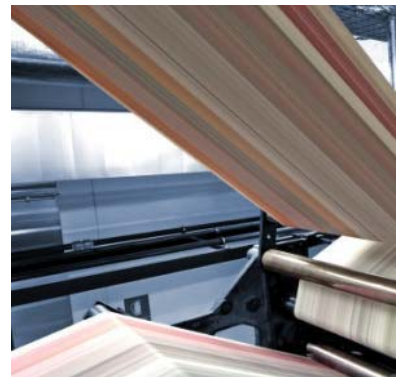
各軸に関する質問：

1. 軸にポイントツーポイントの移動が必要ですか？（ポジションモードによる制御）

- a. 可能な限り負荷とメカニズムのイナーシャを少なくしてください。例えば、可能であれば鋼の代わりにアルミニウムを使用するか、もしくは、構成する部品から必要の無い金属を除去します。特に必要がなければ、直径の大きな部品は不要です。旋回する部品の中心軸まわりのイナーシャモーメントは、直径の4乗に増えることを覚えておいてください。
- b. ブッシュからベアリングに変更、アクメねじからボールねじに変更するなど、できるだけ摩擦を減らしてください。
- c. 可能な限りメカニズムのコンプライアンスを軽減します（能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを確認しながら検討します）。
- d. ベルトやギア駆動からダイレクトドライブに変更するなど、可能な限り装置に存在するバックラッシュ減らす、または、完全に無くします。
- e. 負荷とモータを繋ぐ駆動系の部品点数を最小限に抑え、可能な限り高い剛性にします。例えば、ラックピニオンでは、高い加減速中にラックとピニオンが外れないように、両者が完全に啮合するようにします。
- f. リジッド（圧着などによる）接続や同等のカップリングを使用した接続を行う場合、可能な限り直線的に接続し曲がりやうねりが無いようにします。
- g. アプリケーションにインデックス（特に高速の）が必要な場合、能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを確認しながら最適なフィードバックを選定します。
- h. 提案された制御方法が、安全やその他仕様を満たし、達成可能であることを確認します。
- i. 基本的なメンテナンスの手順について、プロセスや安全に関する基準に従った手順であるか検討します。

2. 軸は、連続した速度制御を必要としますか？（速度モードによる制御）

- a. 以下が当てはまる場合、速度公差を長期的な公差と短期的な公差に分けて考慮します。
 - I. 非常に短期的な速度公差がより重要あるいは優位にある場合（ある時間単位ごとに必要な短期的な Δ 公差）、通常よりも大きい負荷のイナーシャが必要であると考えられます。（この場合、機械のプロセスを理解する必要があります。このプロセスには二通りの方法があり、一つは最小負荷イナーシャ（最大のフィードバック分解能による）と意図的に設計されたより大きな負荷イナーシャ（短期間の応答を抑える）のどちらかを選ぶことができます。しかし、機械のプロセスの情報がない状況でこの判断を行うことは非常に困難です。）
 - II. 長期的な速度公差が優位にある場合（ある時間単位ごとに必要となる長期的かつ厳しい Δ 公差）、通常、フィードバックの分解能を高め、負荷とメカニズムのイナーシャを低減、サーボが最高の帯域幅を維持できるようにします。
 - III. プロセスが長期的／短期的な速度公差の双方を必要とする場合：負荷とメカニズムのイナーシャを減らし、能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを確認しながら最適なフィードバックを選定します。
- b. 長期的／短期的な速度公差の双方を必要とする場合：
 - I. 可能な限り負荷とメカニズムのイナーシャを減らし、帯域幅を改善して応答性を向上させます。
 - II. 可能な限り摩擦を減らします。
 - III. 特にプロセスが低速アプリケーションである場合、可能な限りスティクション（静摩擦）を減らします。
 - i. メカニズムのバックラッシュを解消します。
 - ii. メカニズムのコンプライアンスを可能な限り減らし、適用可能な場合、圧着方法による接続や同等の剛性を持つカップリングを使用し、負荷とモータ間を繋ぐ部品数を最小限に抑えます。
- c. 能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを確認しながら、フィードバックの解像度を最大限高くします。
- d. 制御：可能であれば、時間毎の偏差により制御するポジションモードのドライブを使用します（サーボモータをポジションループで実行した場合、一般的に安定した一定の速度公差が得られます）。
- e. 提案された制御方法が、安全やその他仕様を満たし、達成可能であることを確認します。
- f. 基本的なメンテナンスの手順について、プロセスや安全に関する基準に従った手順であるか検討します。



3. 軸は、ある負荷に対して連続的な力を加える必要がありますか（トルクモード）？

- スティクションが問題になる可能性があるため、できるだけ摩擦を減らします。
- ロックされたロータのステータにある時間内外力が加えられる場合、それに応じたモータのサイズを調整する必要があります。しかし、これは一般的なサーボモータの使用方法ありません（多くのサーボモータの場合、低い回転数（ステータが停止している状態）でその熱分布が評価され、また、保証されています）。
- 提案された制御方法が、安全やその他仕様を満たし、達成可能であることを確認します。
- 基本的なメンテナンスの手順について、プロセスや安全に関する基準に従った手順であるか検討します。



4. 軸が極端に低速（1rpm以下）である必要がありますか？

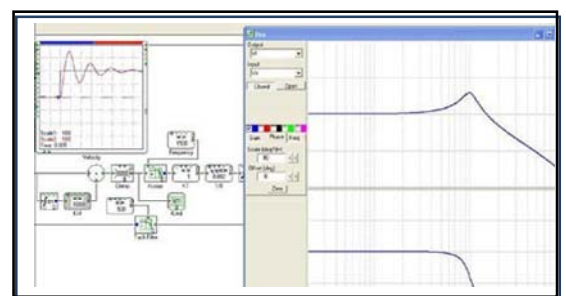
- スティクションが問題になる可能性があり、摩擦とスティクションを可能な限り減らします。
- メカニズムなバックラッシュを解消します。
- メカニズムのコンプライアンスを可能な限り減らし、メカニズムに適用可能な場合は圧着方法による接続または同等の剛性を持つカップリングを使用し、負荷とモータ間を繋ぐ部品数を最小限に抑えます。
- 能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを確認しながら、フィードバックの解像度を最大限高くするか、もしくは必要最小限にします。
- 制御：もし、速度制御かポジション制御のアプリケーションとするか検討しているのであれば、時間枚の偏差により制御するポジションモードのドライブを使用します（サーボモータをポジションループ内で実行した場合、一般的に安定した一定の速度公差が得られます）。
- 提案された制御方法が、安全やその他仕様を満たし、達成可能であることを確認します。
- 基本的なメンテナンスの手順について、プロセスや安全に関する基準に従った手順であるか検討します。

5. 軸は、垂直方向に動きますか？

- フェールセーフブレーキ（モータ内蔵または外付けの軸ブレーキ）および/または平衡負荷を使用します。
- フェールセーフブレーキを使用する場合は、対象ブレーキの物理的な係合と解放を司るコマンドにて遅延時間を設定しタイミングをとるようにします。
- 平衡負荷を使用する場合は、付加的な負荷のイナーシャとそれが加速と減速のトルクに及ぼす影響を考慮します。
- 平衡負荷を使用する場合は、実際のプロセスのサイクル時間がトレードオフの関係にあり、その結果から負荷の一部だけが平衡をとっています。
- 部分的にアンバランスな負荷の場合、適用可能なら電流オフセットを使用して不平衡負荷を相殺し、制御ループの積分要件を最小限に抑えます（通常は位相シフトを押さえリスクを低減します）。
- 提案された制御方法が、安全やその他仕様を満たし、達成可能であることを確認します。
- 基本的なメンテナンスの手順について、プロセスや安全に関する基準に従った手順であるか検討します。
- 代表的な軸の制御モード（ポジション、速度など）については、上記の推奨事項を参照してください。

各軸の設計アプローチの概要

サーボモータ制御軸の帯域幅を広げて応答性と制御性を高めるには、機械やその機能に影響するさまざまな要因を組み合わせる必要があります。この要因には、摩擦とスティクション、外的負荷、バックラッシュとコンプライアンス、モータの負荷とメカニズムによるイナーシャ、フィードバックの分解能、また、これらが該当する場合、モータのドライブ、PWM/SVMとその更新レート（コントローラが存在する場合は、その更新レート）が上げられます。さらに、設計上の



固有振動数と共に負荷とモータを繋ぐ部品の総数（最小限にすることが望ましい）は、メカトロニクス設計が完成するまでに考慮する必要があります。

製造のプロセスがまだ決まっていない機械では、コストの削減を合理的に決定することはできません。これは、選択した運用プロセスにおいて、機械の初期パフォーマンスのトレードオフとコスト削減よりも優先順位を決定する必要があります。初号機の製造では、最も低いコストで最高の機能を設計することが最良の場合があります。新しい機械が、能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフで示す条件を満たしている場合でもコスト削減の余地はまだあります。また、条件を満たしている場合、コンポーネントが追加の機能を必要とするときに追加のコストをより簡単に正当化することができます。

その他の質問と考察：

1. 機械は、複数の製品を生産することができることになっていますか？

- a. 製品のそれぞれのサイズが、製品のサイズ範囲の関数として定義されなければなりません。
- b. サイズが最も小さい製品は、一般的に生産率を最大にするためのモーションプロファイルに影響を与えます。
- c. 目標とする生産率はどの位ですか？メートル/分、分あたりの生産数量など
 - i. 最大動作速度を設定：連続運転、または特定の動作プロファイル用
- d. 特定軸の動作に必要なプロセスの許容差はどの位ですか？
 - i. 特定軸の動作に必要なプロセスの許容差はどの位ですか？
- e. 最低限必要なフィードバックの分解能とメカを介した製品に対する精度を設定、または、セカンダリフィードバックデバイスの必要性を（能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフを参照しながら）検証します

注意！

その他の質問とその考察は、上記で定義された軸に対して、軸毎にさらに新しい設計を用いて絞り込むことを目標としています。

2. バックラッシュやコンプライアンスの対策が能力上昇に伴うコストの上昇率とその上限のグラフで示すコストの上限を超えている場合、プロセス上の利点がありますか？

必要に応じて、追加となる機能や信頼性のためのコスト/価格の正当性を設定します。

3. 始動または停止、メンテナンス、安全に関する必須の条件など特定の条件はありますか？

- a. 必要不可欠な要件や仕様に付いては、最終的なモータやドライブの選定、制御のアーキテクチャが決められた後に決定します。例えば、通信ケーブルがコントローラとサーボドライブの間で切断された場合に軸が現在のポジションを保持する必要があるか？と言った場合では、サーボドライブは、外付けのコントローラから送られるトルク/速度指令によって対象となる軸を制御する必要がある可能性が高くなることが考えられます。

結論

機械設計者は、新しい機械の設計、設計変更や仕様変更などに関連したテクノロジーの複雑さと知識の障壁の課題に絶えず直面しています。最新のサーボシステムテクノロジーをシンプルな設計手法で活用して機械を構成し、実行しなければならない項目を特定することで、開発リスクを効果的に管理し、最適な機械性能を達成しながら開発時間を短縮できます。

KOLLMORGENについて

Kollmorgenは、世界中のお客様にオートメーション機器やドライブシステムを供給するメーカーです。100年以上の歴史を数え、モーションコントロールの設計やアプリケーションの構築などにその経験を活かしたソリューションの提供と性能、品質、信頼性、使いやすさを追求した各種製品の販売を行っています。

Kollmorgenの製品の詳しい情報につきましては、ia-info@kollmorgen-japan.jpにお問い合わせいただくか、Kollmorgenのウェブサイトwww.kollmorgen-japan.jpをご覧ください。