ビジョンエキスパートのための モーション制御入門:パート1

マイク・ファッセル

モーション制御は、多くの自動光学検査システムやビジョンガイド製造システムの重要な要素である。

モーション制御は、多くの自動光学検査システムやビジョンガイド製造システムの重要な要素である。それによってカメラとその対象物の動きを精密に制御することが、高速で高品質な生産に不可欠である。モーション制御を利用すれば、業界において目まぐるしく変更される、プラスチックやパッケージなどの製品構成に対応して、すばやく自動的に再構成することが可能な、より柔軟性の高いビジョンシステムを構築することもできる。

機械学習と推論に基づくビジョンシステムの性能も、モーション制御の追加によって改善することができる。対象物が常に確実にカメラの視野内に配置されるようにすれば、画像間のばらつきにつながる主な要因が排除される。これによって、ニューラルネットワークのトレーニングに必要なデータセットのサイズを縮小できるだけでなく、低消費電力の組み込みシステム上で高速に実行する、小さなサイズのネットワークが生成される。

膨大な種類のモーション制御技術に圧倒されて、最初の一歩を踏み出せないというケースもあるだろう。本稿は、ビジョンの専門家を対象にモーション制御の基礎を紹介する、3部構成の記事の第1弾である。いくつかの一般的な種類のモーション制御ハードウエアを紹介し、その主要な仕様の意味を説明し、それらの仕様を基に、自分のシステムの性能、信頼性、コストの改善につながる、モーション制御機器を選択する方法を示したいと思う。

モーションの種類

自分のビジョンシステムのモーター制御要件を判断するための最初のステップは、必要なモーションの種類を特定することである。6つの自由度が存在する。自由度は、1つの軸に沿って負荷を線形方向に押す、引く、運ぶ、または持ち上げる動作(**図1**のa、b、c)と、1つの軸を中心に負荷を回転または傾斜させる動作(図1のd、e、f)という、移動(3軸に対する並進移動と回転移動で合計6つ)に基づいている。一般的に、モーション制御コンポーネントは、他の5つの自由度における不要な動きを最小限に抑えながら、1つの自由度における高速で正確な動きを提供するように設計される。

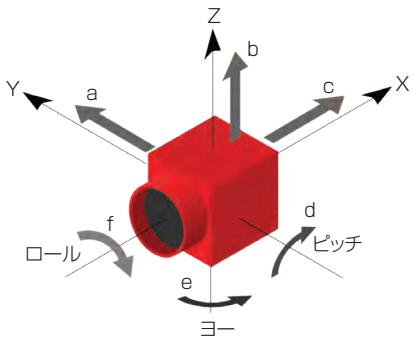


図1 動きの6自由度は、並進移動(a、b、c)と回転移動(d、e、f)に基づく。右側に示されているのは、リニアステージ及び垂直移動ステージ(g、h)と、回転ステージ(i)の例である(写真と図は、ゼイバー社提供)。

モーション制御機器の構造

特定軸に対して物体を動かすには、主に次の5つのコンポーネントが必要である。

- 負荷を動作軸にしっかりと固定し、動作軸に沿ってガイドする機構
- 負荷を動かすための機械力を生成するモーター
- 正しい電流を正確なタイミングでモーターに供給するモータードライバ
- ドライバとのデータインタフェースを提供するコントローラ
- 移動軸に沿った位置決めの較正と測定を行うセンサ

これらのコンポーネントを個別に調達して統合することも可能だが、加ゼイバー・テクノロジーズ社(Zaber Technologies)の「Xシリーズ」は、そのすべてを1つに統合したポジショナである(**図2**)。

主要な仕様

利用可能なモーション制御オプションの機能を、自分のビジョンシステムの要件に適合させることにより、意図

した処理を高速かつ確実に実行できるシステムを、不要なコストや複雑さを追加することなく構築することができる。例えば、半導体パッケージングシステムは、システム内の各ポイントによって、正確度や反復性に対する要件が異なる。チップレットダイのピックアンドプレースには、ナノメートルレベルの正確度と反復性が必要だが、完成したICをキャリアテープリールのポケットに配置する処理には、ミリメートルレベルの位置合わせ精度しか要らない可能性がある。このセクションでは、モーション制御機器の機能定義に用いられる主要な仕様について説明する。これらの仕様に影響を与える要因については、シリーズ第2弾の記事で取り上げる予定である。

正確度とは、移動軸上の任意の2つの位置について、両方の位置に同じ方向から近づく場合に、(2つの位置の間の距離に)生じる可能性のある最大誤差のことである(**図3**)。

反復性とは、同じ方向からの複数の動作サイクルにおいて、ステージがどれだけ正確に同じ位置に戻ることができるかを表す指標である。これは、実際の位置の最大偏差である。

高スループットの産業プロセスに対する自動検査や制御では、サイクルタイムの最小化が不可欠で、反復性が正確度よりも重要である場合が多い。高い反復性は、一度較正されたシステムが、高い一貫性を維持しながら一連の反復動作を実行することを保証し、サイクルタイムの増加やスループットの低下につながる、位置の細かい再調整を不要にする。

対象物またはカメラを動かすことによって、細かい焦点制御を行うビジョンシステムに対しては、バックラッシュが重要な性能仕様である。バックラッシュは、機械システムのたわみを表す指標で(**図4**)、小さな動きの正確度と反復性に大きな影響を与える可能性がある。ステージの位置決めの正確度と反復性に対するバックラッシュの影響が最も大きくなるのは、移動方向が反転するときである。負荷を動かす前に、駆動システムのたわみを解消する必要が生じるためである。検査システムが試みる焦点微調整の動きが、モーション制御機器のバックラッシュよりも小さい場合、カメラまたは対象物の位置は全く変わらないことになる。ここで、一部のメーカーは、「バックラッシュ」という用語を使用せず、単方向と双方向の反復性の差として、この仕様を示すことに注意してほしい。

ヒント：毎回同じ方向から目標位置に戻ることにより、小さな動きの反復性を最大化する。これによって、ステージを駆動する機械コンポーネントの前面と背面の間のわずかな非対称性の影響を抑えることができる。

システムを確実に仕様どおりに動作させるには、必要な負荷を効果的に支持及び移動できるステージを選択することが不可欠である。最大中心負荷(**図5**)は、妥当な性能と機器寿命を維持しつつ、ステージに印加できる、移動軸に垂直な力の最大値である。負荷は、質量(kg)ではなく、力の単位(ニュートン、N)で表される。負荷は、質量、重量負荷、その他の要因の組み合わせに起因する可能性があるためである。これらの力の大きさは、ステージに搭載される物体の質量とその動きに依存する。軽い物体を非常に高速に動かす場合のほうが、それよりもはるかに重い物体をゆっくりと動かす場合よりも、大きな力がかかる可能性がある。最大中心負荷は、次の式で計算される。

F(単位：ニュートン)＝質量(単位：kg)×加速度(単位:m/s^2)

ほとんどの条件下において、中心負荷の加速度は、重力のみに基づく。重力加速度は、約9.8m/s^2である。

カンチレバー負荷は、ステージの特定の回転軸方向に印加されるトルク(図5)のことで、ベアリングに対する不均一な負荷と、摩擦の増加を引き起こす。カンチレバー負荷の大きさは、次の式で計算することができる。

カンチレバー負荷(単位：Nm)＝力(単位:N)×距離(単位:m)

速度とスラストは、すべてのモーション制御機器において重要な選択基準である。高い速度とスラストは、サイクルタイムの最小化が不可欠となる、高スループットの用途において特に重要である。最大スラストは、ステージが移動方向に印加できる力の最大値で、ニュートンの単位で表される。最大速度は、負荷がない状態でのステージの最大移動速度である。

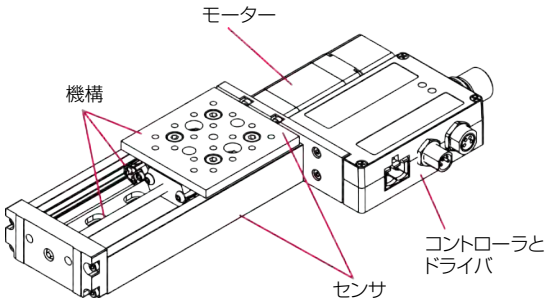
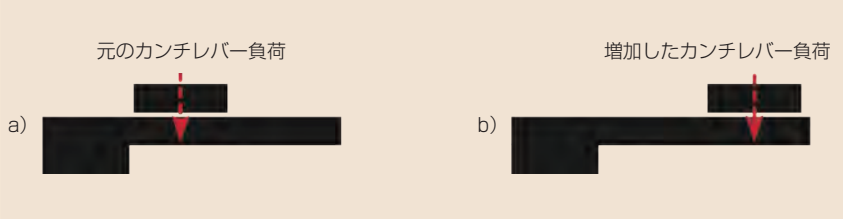
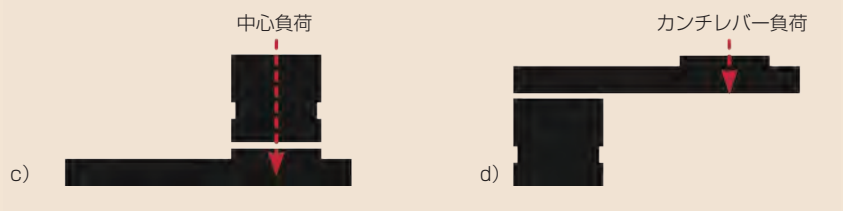


図2　機構、モーター、モータードライバ、コントローラが1つの機器に統合された「Zaber X-LSM050」リニアステージ。

ヒント：システムのカンチレバー負荷を、移動の両端で確認する。ステージ上のカンチレバー負荷（a）は、負荷が移動範囲に沿って動くにつれて増加する（b）。



複数の機器を組み合わせる場合は、互いの取り付け方法を検討する。垂直ステージをリニアステージの上に取り付けると、中心負荷がリニアステージに印加される（c）。リニアステージを垂直ステージの上に取り付けると、カンチレバー負荷が垂直ステージに印加される（d）。



非常に高速で高スラストの機器が提供されている。しかし、画像取得または処理にかかる時間が、ビジョンシステムのボトルネックであるならば、コストをかけてより高速なモーション制御機器を購入しても、サイクルタイムの短縮やスループットの向上は望めない。

特に高解像度のカメラが必要な場合は、高スラストで高速なモーション制御機器によって、カメラのコストを大幅に削減できる可能性がある。対象物の減速と再加速を高速に行うことができれば、サイクルタイムやシステム性能に悪影響を与えることなく、ローリングシャッターカメラを、それよりもはるかに高額なグローバルシャッターセンサを搭載するカメラの代わりに使用することができるかもしれない。

スラストと速度の組み合わせは、ステージの寿命に影響を与える。より大きな負荷をより高速に動かす場合ほど、ステージに印加される力は大きくなる。これによって、より多くの熱が駆動機構に生成されて、機械コンポーネントがより早く摩耗する。長期にわたって高い速度とスラストで稼働することが求められる用途に対しては、初期費用が高くなっても、最大速度とスラストの仕様にかなりの余裕がある機器を購入しておくことが、長い目で見れば大きなコスト削減につながる。高仕様のモーション制御機器を利用すれば、耐用年数は長くなり、保守の必要性は軽減される。速度及びスラストと、それらに影響を与える要因との間の関係については、第2弾の記事で詳しく説明する予定である。

機械的仕様がモーション制御機器において重要であることは明らかだが、電気的仕様も、システム統合のしやすさに影響を与えるので、見過ごしてはならない。IO線を備えたコントローラは、高スループットのマシンビジョン用途での利用に理想的である。出力線は、設定作業をほとんど必要とすることなく、信頼性の高い低遅延のカメラトリガを可能にする。ステージがターゲット位置に到達したときに、カメラを直ちにトリガすることによって、サイクルタイムを最小化することができる。IOトリガは、生産または検査システムのモーション制御、照明、撮像コンポーネントの同期を確実に維持するための簡単な手段である。

IOの公称電圧を機器間で一致させることが重要である。+5V TTLは、多くのモーション制御機器の一般的なデジタル出力だが、光絶縁入力を持たない、一部の低消費電力の+3.3Vシングルボードコンピュータの推奨入力電圧を超えている可能性がある。主要メーカーから提供されている、ほとんどのマシンビジョンカメラが、光絶縁入力端子を備え、+5V入力に対応する。

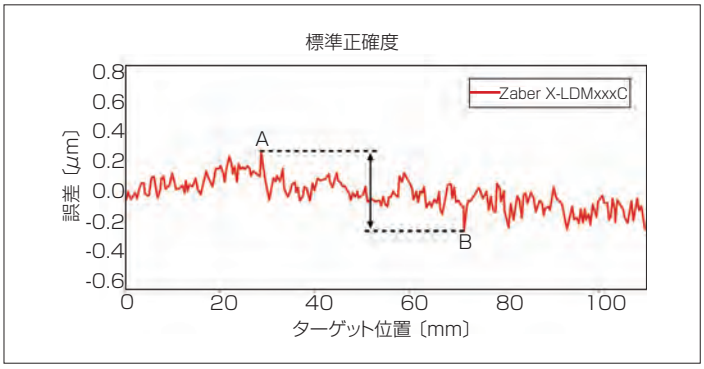


図3　リニアステージの正確度グラフの例。このグラフには、ステージの移動範囲における期待される位置と実際の位置の差が示されている。生じ得る最大誤差は、A点とB点の差で0.6μmである。

統合のメリット

ビジョンシステムの設計者は、イメージセンサ、FPGA、画像信号処理IPコア、インタフェースバックエンドを個別に調達して統合することが可能だが、ほとんどのユーザーは、利便性を考えて、既にそれらが統合されたカメラを選択する。モーション制御においても同様である。ステージ、モーター、ドライバ、コントローラを個別に調達して、互換性の確認、設定、較正を行うのは、複雑で時間のかかる作業になる可能性がある。コントローラやドライバが組み込まれたモーション制御機器を選択すれば、機器選定と設定の作業は簡素化される。

コントローラやドライバが組み込まれた機器の中でも、同じ制御プロトコルを共有するものを選択すれば、システム設計はさらに簡素化される。それらは、箱から取り出したままの状態で、モーション制御の構成要素としてシームレスに連携するため、オートメーション要件の変更に応じて、機器を簡単に結合したり、結合し直したりすることができる。

同じ制御プロトコルやAPIを共有する、統合型コントローラ機器により、照明、画像取得、処理において複数軸にわたる協調動作を必要とするシステムを、さらに高速かつ簡単に構築することができる。カスタムアプリケーション開発に必要なライブラリの数が最小限に抑えられれば、より小型で高効率のアプリケーションが得られ、そうしたアプリケーションは、保守が容易になる他、リソースが限られた組み込みシステム上での動作に、より適したものになる。同じ制御プロトコルを共有する機器は、デイジーチェーン構成にも対応できる。デイジーチェーン構成では、複数の機器の給電と制御を、ホストからの単一のケーブルで行うことができるため、配線が簡素化されてコストが削減される。1本の配線による接続は、スペースを節約することや、組み込みシステムでは限られている場合が多いポートやIO端子を解放することにもつながる。

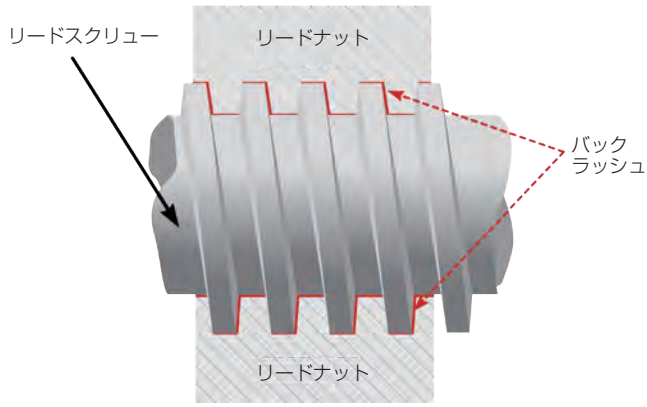


図4　リードスクリューによって駆動されるシステムでは、リードスクリューのスレッドと、それに対応するナットのスレッドの間のわずかな隙間によって、機械的なたわみが生じる。

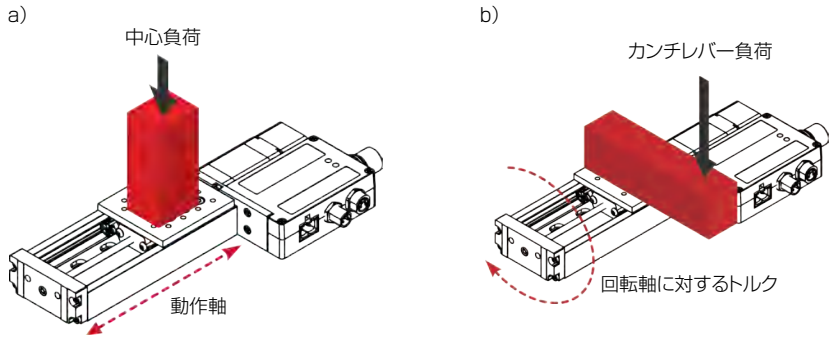


図5　(a)中心負荷は、動作軸に垂直な力を印加する。(b)カンチレバー負荷は、回転軸に対するトルクを印加する。

統合型機器のもう1つのメリットは、設計が統一されているために、無駄を省いた使いやすいドキュメントが作成できることである。予期せぬ問題のトラブルシューティングは、単一の包括的なドキュメントを使用するほうが、複数の独立したコンポーネントの互いに矛盾する部分があるかもしれないドキュメントを個別に参照するよりも、はるかに容易に行うことができる。

モーション制御は、自動生産及び検査システムに不可欠な要素である。モーション制御機器の主要な仕様を理解することは、設計を最適化して、ビジョンシステム(ひいては、ビジョンシステムに費やしたコスト)を最大限に活用するために役立つ。適切なモーション制御機器を選択することが、高速なサイクルタイム、高いスループット、高い信頼性を備えたシステムを、低いコストですばやく設計、構築、実装することにつながる。

本シリーズの第2弾では、本稿で説明した基礎を前提に、異なる種類のモーター、駆動、ベアリングがビジョンシステムの性能に与え得る影響について説明する。ビジョンシステム設計をさらに最適化するために必要な知識を提供する予定だ。

著者紹介
マイク・ファッセル(Mike Fussell)は、加ゼイバー・テクノロジーズ社(Zaber Technologies)のライフサイエンス担当セールス及びマーケティング部門所属。URL: www.zaber.com

VSDJ