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2

マイク・ファッセル

適切な組み合わせのモーター、エンコーダ、ベアリング、駆動機構を備えたモーション制御機器を選択することにより、ビジョンシステムの精度、スループット、信頼性、コストに多大な影響を与えることができる。

本稿は、ビジョンエキスパートを対象にモーション制御の基本を解説する、3部構成の記事の第2弾である。パート1では、モーションの種類と、ドライバやコントローラが組み込まれた機器のメリットと主要な仕様について説明した。パート2ではその内容を基に、用途に最も適したモーター、エンコーダ、ベアリング、駆動機構を備えた機器を選択することによって、ビジョンシステムの性能とコストを最適化するために役立つ知識を提供したいと思う。

モーターの種類

モーターは、すべてのモーション制御機器の基盤である。モーターには、2つの主な種類が存在する。1つは、ステッパーモーターやサーボモーターなどの回転モーターで、回転動作をリニア動作に変換するための駆動機構を必要とする。もう1つは、リニアモーターで、追加の駆動機構なしで直接リニア動作を生成する。

ステッパーモーター

ステッパーモーターは、歯車形の永久磁石ローターの周囲に、相対するものの極性が逆になるように並べられた電磁石を使用して、回転動作を生成する。1つの歯集合の位置が最も近い電磁石に揃う時、それに隣接する歯集合は、その近くの電磁石に部分的に揃う形になる。電磁石を順に励磁することにより、ローターの歯集合はある磁石集合から次の磁石集合へとステップする。

ステッパーモーターの歯が多いほど、移動ステップは小さくなる。加ゼイバー・テクノロジーズ社(Zaber Technologies)の「Xシリーズ」のモーション制御機器に組み込まれているようなステッパーモーターコントローラは、複数の電磁石集合を同時に部分的に励磁することによって、ローターを中間位置のステップに移動させる、マイクロステップが可能である(**図1**)。

ステッパーモーターは、低速で高いトルクを供給するため、荷重を静止位置に保持することができる。従って、無人航空システム(Unmanned Aerial System:UAS)上のカメラの安定化と位置決めに最適である。UASの移動時の重力と加速度に逆らって、カメラや光学部品を適切な位置に保持できるためである。ステッパーモーターは、低速で高いトルクを生成することにより、荷重をすばやく加速することができる。これは、小さく正確な一連の動きによってサンプルを複数の位置の間ですばやく動かす必要のある、マイクロプレート内の生体サンプルのイメージングなどの用途に有効である。3Dプリンターノズルの小さく高速な繰り返し動作も、ステッパーモーター駆動に非常に適している。高速になると、回転あたりの磁界変化数が多くなるため、ステッパーモーターの最大トルクは低下する(**図4**)。

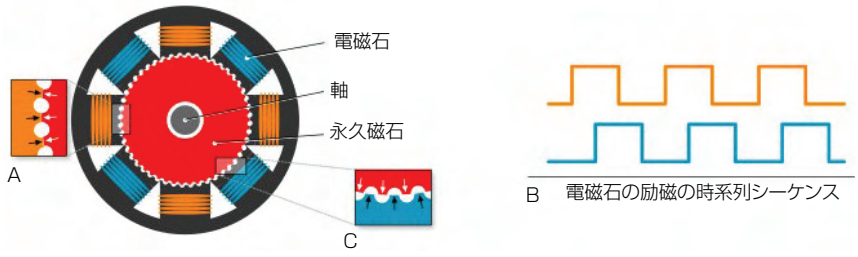

図1　ステッパーモーターの基本設計(A)。電磁石を順に励磁すると(B)、ローター上の歯は、励磁した電磁石に引き付けられて、それと位置が揃う(C)。そのとき、隣接する電磁石の歯は位置がずれた状態となり、モーターは次のステップに移る動作に入る。(図提供:ゼイバー・テクノロジーズ社)

サーボモーター

サーボモーターは、回転軸に取り付けられた一連の永久磁石の周囲に並べられた電磁石によって、回転動作を生成する。電磁石を順に励磁することで、永久磁石を1つの方向に引く力が生成される(**図2**)。効率的に動作して幅広い速度にわたって最大の力を生成するには、サーボモーターに電子部品を追

加する必要があるため、そのコストはステッパーモーターよりも高くなる。

サーボモーターは、その速度範囲にわたって一定のトルクを生成するため、高速で高いトルクを供給することができる。従って、プリントや薄膜製造のような高速連続フロープロセスの駆動に最適である。一部の産業用ビジョンガイド自動製造システムに搭載されている、ルーター（外形加工機）やドリルなどの高速工具には、サーボモーターが使われている。レーザビームプロファイリングスキャナやライダ（LIDAR）用のミラーなどの軽量荷重を動かす場合は、サーボモーターのほうがステッパーモーターよりも生成熱が少ないため、カメラやプロセッサからの熱の管理が問題となることが多いモバイルロボティクスなど、スペースに制約のある組み込みシステムには、サーボモーターが有効である。

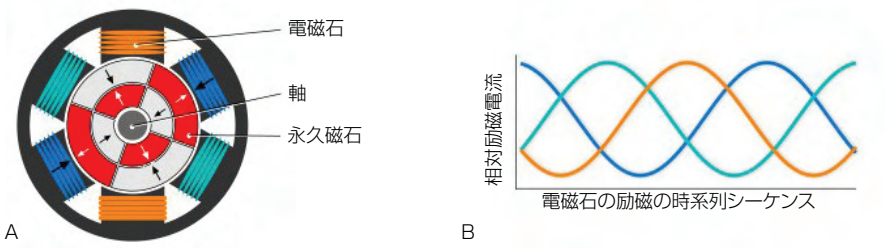

図2　サーボモーターの基本設計（A）。電磁石を順に励磁すると（B）、ローター上の永久磁石は、モーター本体に固定された電磁石に順に引き付けられて、回転する。

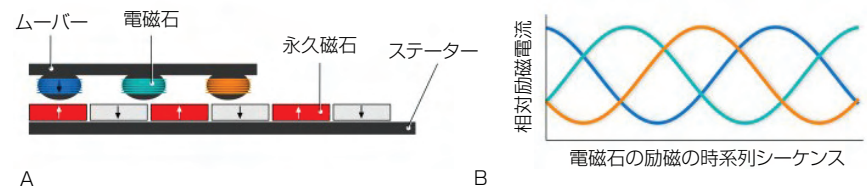

図3　リニアモーターの基本設計（A）。ムーバー上の電磁石を順に励磁すると（B）、電磁石は、ステーターに固定された永久磁石に順に引き付けられて、移動する。

リニアモーター

リニアモーターは、一列に並んだ電磁石を順に励磁することによって、ムーバーを永久磁石のトラック上で移動させる（**図3**）。機械部品を追加する必要なく、リニア動作を直接生成する。それらの駆動部品がなくなれば、摩擦やバックラッシュの主な要因が取り除かれる。これによってリニアモーターは、非常に高速な加速が可能で、非常に高い精度と反復性を達成する。リニアモーターは、回転モーターよりもコストが高いが、その高い精度と加速に加えて、耐用年数が実質的に無限であることから、投資に見合う十分な価値がある。リニアモーターによって、保守や予定外のダウンタイムに伴うコストは低下し、スループットは高まる。

非通電時は、リニアモーター機器は自由に動くことができる。荷重を適切な位置に保持するには、通電状態を維持しなければならない。オートフォーカスシステムのように、リニアモーターを垂直構成で使用する場合は、ゼイバー社の「X-LDA」や「X-LDM」のようなリニアモーター機器で提供されているような平衡力が、重力を相殺する。これにより、システムの消費電力が低下し、生成熱が減少する。高い精度とスラストを併せ持つことから、リニアモーターは、キヤノン、ソニー、ニコンが提供する、多くの新しい高性能な民生カメラレンズのアクチュエータとして採用されている。高速加速を行うリニアモーターは、大きな液体レンズを歪ませる可能性がある。モーターの加速度を抑えることにより、この効果は緩和される。

リニアモーターはその高い精度と反復性により、PCBの部品配置と検査に最適である。この用途には、部品を正確に配置するための非常に高い反復性が求められる。また、高いスループットが求められるために、短い高速な動きが必要で、回転モーター駆動の機器では、部品がすぐに摩耗してしまう。ナノメートルレベルの最小単位でのインクリメンタル動作が可能な、高品質のリニアモーターは、半導体パッケージングに必要な、きめ細かい制御を提供することができる。これらのシステムには、積層されたチップレットを正しいインターコネクトに確実に位置合わせするための、非常に高い精度と反復性が求められる。

エンコーダ

エンコーダは、機械的な動きを検出するセンサである。エンコーダには多くの異なる種類が存在する。光学エンコーダは、高い分解能、反復性、精度を備えるため、ビジョンシステムの多くの用途に対して最適である。エンコーダは、対象物の動きと画像取得の間の厳密な同期を可能にする。エンコーダから駆動されたデジタル出力信号により、ラインスキャンカメラを正確かつ高速にトリガすることができる。ラ

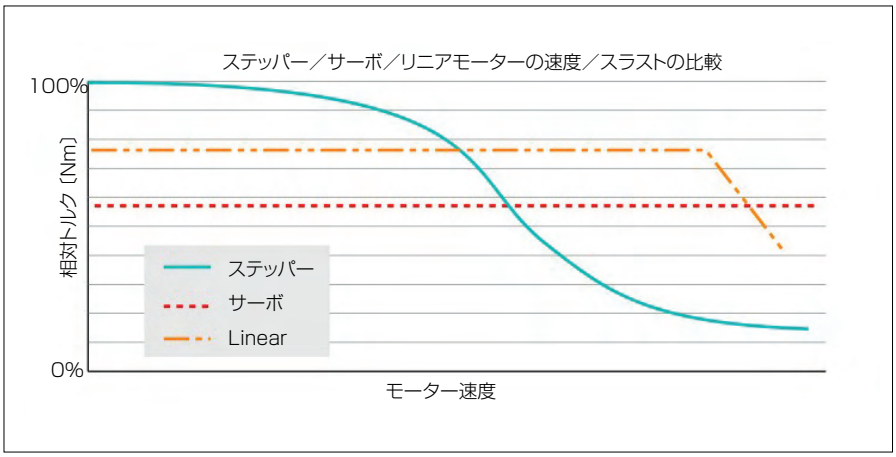

図4　ステッパー／サーボ／リニアモーターの速度とスラストの比較。

インスキャンカメラのトリガをエンコーダ信号に同期することにより、対象物の動作速度の変動に起因する歪みを取り除くことができる。システムの動きによって直接駆動されるカメラトリガ信号は、速度のばらつきを自動的に補正する。固定のラインレートで動作するカメラでは、これを行うことはできない。

モーターエンコーダは、駆動モーターの回転を測定する。移動経路上のキャリッジの絶対位置を測定するわけではないため、モーター回転からキャリッジ位置への機械的変換に欠陥があると、報告位置の精度に影響が生じる。モーターエンコーダは、ステッパーモーターの進みや遅れを検出することができる。駆動モーターの限界近くで動作する、マルチスペクトルイメージングシステム内の高速光学フィルタホイールに遅れが生じると、モーターエンコーダによってシステムは、位置基準を失うことなく、その問題を検出して自動的に正常状態に復旧する（例えば、速度を落とす）ことができる。

ダイレクトエンコーダは、リニアステージの絶対位置と回転ステージの角度を測定する。ダイレクト位置測定は、報告位置の精度が、モーター回転からキャリッジ最終位置への変換の機械的欠陥による影響を受けないことを意味する。モーターコントローラは、このデータを使用して目標位置に近づくことができるため、ステージの精度と反復性が高まる。ゼイバー社は、干渉計に基づく校正を適用して、エンコーダと絶対位置の間の小さなオフセットを補正している。この補正は、ゼイバー社の機器に組み込まれたコントローラによって適用されるため、高精度な光学及び計測システムの設計は簡素化される。

分解能が1nmのダイレクトエンコーダは、高倍率の光学部品を利用する、半導体ウエハやパッケージングの検査システムのスループットを最大化するために役立つ。高分解能のエンコーダがあれば、機器コントローラは、システムの振動を測定して、目標振動しきい値を下回った直後にカメラをトリガすることができ、任意に設定されたセトリング時間が経過するのを待つ必要はない。これによって、不要な遅延をなくし、システムのスループットを高めることができる。

ベアリング機構

ベアリングは、可動部品が1軸上を効率的かつ滑らかに移動し、その他すべての軸で不要な動きが生じないように制限するものである。誤ったベアリングを選択すると、検査対象物に摩擦や痙動が生じ、ラインスキャン画像に不要な歪みが生じる可能性がある。ベアリングの剛性が不十分な場合は、振動に起因するぼけが長露光画像に生じ

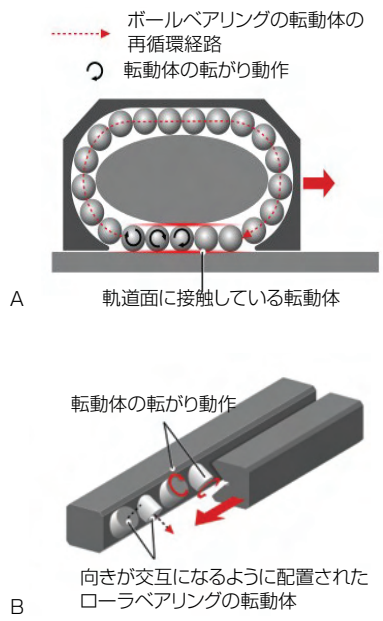

図5　再循環ベアリングは、軌道面上を移動するベアリングブロックの中に複数の転動体が含まれている。移動距離は、軌道の長さによって制限される。クロスローラベアリング（B）は、1軸上を滑らかに移動しつつ、その転動体の向きに基づき、その他のすべての方向で優れた剛性を備える。

る可能性がある。適切なベアリングを選択すれば、より高額で広開口部の光学部品や、より高出力の照明は、不要にできる可能性がある。

プレーンベアリング

プレーンベアリングは、最もシンプルな形のベアリングである。滑らかな表面上を動く、低摩擦のスライド（滑り）部品を使用して、所望の軸だけに動きを制限する。プレーンベアリングはシンプルなために、軽量で小型で安価である。ドライランニングのポリマー製プレーンベアリングは、化学的に無害で、自己潤滑性を備えるため、実質的にメンテナンスフリーである。プレーンベアリングはシンプルであることから、カスタマイズも容易である。品質検査システムの中のシンプルなダイバータには、プレーンベアリングが使われる場合がある。

プレーンベアリングには低摩擦材料が使われているが、そのスライド動作は、ボールベアリングやローラベアリングの転がり動作よりもはるかに摩擦が高い。そのため、精密で滑らかで反復性の高い動作が求められる、ビジョンガイドの宝石カットなどの用途には、プレーンベアリングは適していない。プレーンベアリングは摩擦が高いために、より高額だが摩擦の低いボールベアリングやローラベアリングよりも、強力で高額なモーターの使用が必要になる可能性がある。この摩擦により、カンチレバー負荷がかかるとベアリングがバインドする可能性があるため、プレーンベアリングでカメラを動かす場合は、ベアリングの近くにカメラを取り付けることが推奨される。プレーンベアリングは、ボールベアリングやローラベアリングと同程度にプリロードをかけることはできないため、不要な動きを制限する効果は低くなる。軽量なカメラとSマウントレンズならば、プレーンベアリングシステムで適切に動作する可能性があるが、大きな10GigEカメラと高品質のFマウントレンズの場合は、ベアリングがバインドする恐れがある。プレーンベアリングは、その速度と荷重の設計上限を超えて動作させると、摩擦による過剰な熱によってすぐに劣化してしまう可能性がある。

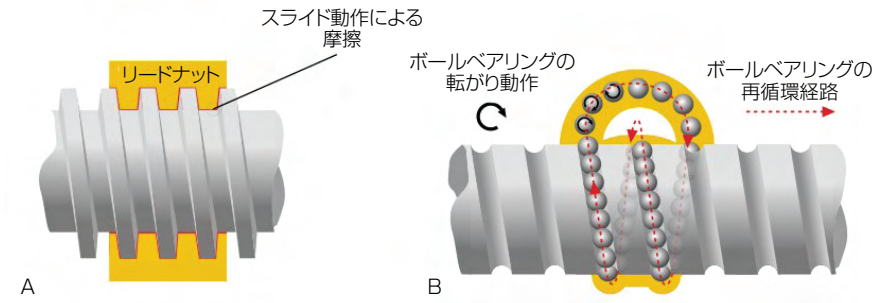

図6　（A）はリードねじとリードナット。リードねじのねじ山とリードナットは、互いにスライドして動作する。リードねじの回転動作がリードナットのリニア動作に変換される。ボールねじ駆動（B）は、ねじ溝を転がる再循環ボールベアリングを利用する。転がり動作はスライド動作よりも、はるかに摩擦が低い。ねじの回転動作は、ベアリングブロックのリニア動作に変換される。

再循環ベアリング

ボールベアリングの転がり動作は、プレーンベアリングのスライド動作よりもはるかに摩擦が低い。閉じたパスの中に配置された複数の転動体（「玉」または「ころ」）が、耐荷重面上を再循環する。再循環ベアリングブロックが移動する、硬化鋼製の軌道面を用意すれば、「無限の移動距離」が得られる（**図5**）。再循環ベアリングは、自動車製造においてビジョンガイドの接着処理を行う直交ロボットに最適である。再循環ベアリングを可動塗布器とガイダンスヘッドに組み込むことにより、システムの移動経路全体に沿ってベアリングを取り付ける必要がなくなり、コストが削減される。

プレーンベアリングよりも摩擦がはるかに低いため、再循環ベアリングを使用する機器は高速動作に適している。また、プレーンベアリングを使用する機器よりも、はるかに高い精度と反復性が得られる。このような性質から、再循環ベアリングは、コンベア上の向きがバラバラのパーツの検査や、溶接検査など、ガントリに支持された移動経路の長いシステムに最適である。

循環する転動体は、軌道面との接触と非接触を繰り返す。転動体のサイズの微小な差異や、軌道面の欠陥が、キャリッジの音響ノイズや振動につながる可能性がある。再循環ベアリングは、滑らかに転がるために潤滑剤が必要である。これによって定期的な保守が必要で、ライフサイクルコストは増加する。

クロスローラベアリング

クロスローラベアリングは、動作軸の低い摩擦と、その他すべての軸の非常に高い剛性を併せ持つ。その摩擦力はきわめて一貫性が高く、予測可能であるため、速度の安定性、高い精度、高い反復性が求められる計測用途に適している。クロスローラベアリングは、携帯端末の有機ELディスプレイを検査するために高倍率の光学部品を使用する検査システムに最適である。そのシステムでは、検査対象物の重要な特

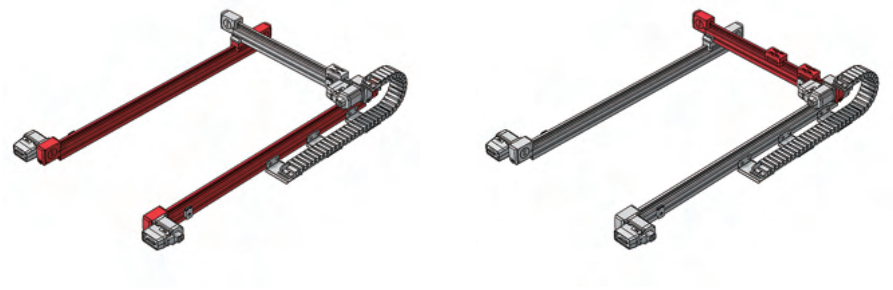

図7　ゼイバー社は、ベルトドライブと再循環ベアリングの組み合わせによって得られる設計自由度を活用して、用途の移動要件に正確に合致する幅広い種類のカスタムなガントリ構成を提供することにより、システムをコンパクトに保ち、コストを最適化している。

徴が、高い一貫性と信頼性で撮影されることを保証するために、マイクロメートルレベルの反復性で保存位置に戻ることが不可欠となる。

クロスローラベアリングは剛性に優れているため、振動を最小限に抑えて、動作の間の迅速なセトリングを可能にする。特に高倍率の光学部品では、小さな振動によっても画像がボケる可能性があるため、セトリング時間が短ければ、スループットは高くなる。ローラベアリングは、ボールベアリングよりも広い面積に荷重を分散するため、重い荷重を支持する場合や高いスラストがかかる場合に適している。クロスローラベアリングは、幅広い種類のロボットにおいて、エンジンブロックや航空機部品のような大きな作業対象物を持ち上げながら、滑らかで効率的で正確な動作を提供するために、一般的に使用されている。クロスローラベアリングの機械的性能を実現するには、高精密製造が必要で、そのためにコストはボールベアリングよりも高くなる。

駆動機構

多くのビジョンシステムに、複数軸のリニア動作を組み合わせて対象物とカメラの位置を相対的に動かす、直交ロボットが使用されている。XとYのリニア軸によって、例えばエンジンブロックのシリンダーヘッド上で、カメラを平面移動させることにより、表面加工の検査が行われる。このリニア動作を行うには、ステッパー／サーボモーターの回転動作を駆動機構によってリニア動作に変換する必要がある。モーター制御機器に使用される駆動機構の種類によって、その機器に適した用途や機器のコストが決まる。

リードねじ

リードねじ駆動の機器では、キャリッジに固定されたリードナットが回転ねじによって駆動されて、移動経路に沿って動く。基本的なリードねじ設計は、幅広い用途に対応するため、特定用途に合わせて最適化することができる。リードねじは、移動量、速度、反復性、化学耐性の要件に応じて、さまざまなサイズ、ピッチ、製造公差、材料で提供されている。リードねじは非常に小さいので、スペースに制限のある設計への組み込みに最適である。セルフロック式のリードねじを使用する機器は、簡単には逆駆動されず、非通電時に位置を保持する。これは、荷重を垂直に持ち上げる動作に最適である。一度荷重の位置決めを行うと、その位置が維持されるためである。リードねじは、多くの少量生産用の高精度な積層造形システムで利用されている。

リードねじの精度と反復性は、その製造精度と長さに依存する。高精度なリードねじほど価格は高い。リードねじの反復性は、長さには依存しないが、精度は、長くなるほど低くなる。

リードねじのねじ山とリードナットは、互いにスライドして動作する（**図6**）。プレーンベアリングと同様に、このスライド動作は、他の駆動機構の回転動作よりも本質的に摩擦が高い。摩擦が高いほど、高いトルクと、大きくて高額な駆動モーターが必要になる。速度と荷重の推奨上限を超えると、すぐに加熱して激しい摩耗が生じる。駆動部品の経時摩耗に伴って、精度は低下し、バックラッシュは大きくなる。最高速度での動作時間が長くなると、摩耗は加速するため、安価なリードねじを駆動機構に使うと、システムの初期コストは低くなるかもしれないが、保守による長期的なコストの増加や、プロセスのドリフトによる歩留まりの低下は、その短期的なコストの削減を上回る可能性がある。リードねじは、低速時に最大の性能を発揮するステッパーモーターと相性が良い。ゼイバー社のX-LSMシリーズのようなステッパーモーター駆動のリードねじステージは、精度、反復性、速度を良好なバランスで備え、コスト効率よく多用途に対応する。ビジョンシステムのプロトタイプ製作や、ロボットガイダンスを目的としたストラクチャードライトとマルチカメラによる奥行き検出ソリューションの研究開発に、広く採用されている。カメラ位置を遠隔から高速かつ正確に調整できるためである。

ボールねじ

ボールねじを使った駆動機構は、リ

ードねじの基本設計に、ボールベアリングの再循環経路を組み合わせたものである。リードナット上をスライドするリードねじとは異なり、ボールねじは、転がり動作のボールベアリングを使用するため、摩擦は大幅に低減される。リードねじよりも機械的構造が複雑であるため、コストは高く、カスタマイズも容易ではない。しかし、摩擦が低いために、SMTピックアンドプレース装置のような、高速で高スループットの用途にはるかに適している。摩擦が低いことから、リードねじよりも小さなインクリメンタル動作も可能で、検査時の非球面レンズの位置決めに用いられる6脚プラットフォームの駆動に適している。

ボールねじは、セルフロック式ではなく、非通電時に位置を維持することはできない。垂直荷重を保持するためのブレーキ機構が必要である。また、リードねじよりも多くの保守が必要で、正しく動作させるために潤滑剤が必要である。そのために、環境汚染に対して敏感で、埃などの異物が浮遊する環境では、混入を防ぐための保護が必要である。適切に保守を行えば、ボールねじはリードねじよりもはるかに長期間使用できる。また、リードねじと比べて、速度や荷重による影響がはるかに低いため、その耐用年数ははるかに予測しやすい。

表1　属性の概要

	ステッパーモーター	サーボモーター	リニアモーター
速度	＋	＋＋	＋＋＋
スラスト	＋＋＋（低速） ＋　（高速）	＋＋	＋＋＋
保持機能	＋＋＋	＋	＋＋
精度	＋＋	＋	＋＋＋
耐用年数	＋＋	＋＋	＋＋＋
コスト	$	$ $	$ $ $

ベルトドライブ

ベルトドライブは、軽量荷重を長距離にわたって高速に移動させるための費用対効果の高い手段であるため、多くの産業用途に広く利用されている。これらのシステムには、鋼鉄、アラミド、またはガラス繊維で強化されたポリウレタン製の歯形タイミングベルトが一般的に使用されており、ステッパーモーターまたはサーボモーターによって駆動される。ベルトドライブシステムは、摩擦が低く、機械的効率が高いため、より小さく安価なモーターによって駆動することができる。これらのシステムはセルフロック式ではなく、逆駆動が容易に生じる。パスポートコントロールキオスクにおけるカメラの位置決めなど、垂直動作に使用する場合は、カメラを所望の高さに保持するためのブレーキ機構が必要になる可能性がある。ベルトドライブは、高速コンベア上の向きがバラバラなパーツを追跡する、ガントリに搭載されたビジョンシステムに最適である。EMC制御のための電子機器筐体部品の陽極酸化皮膜の選択的レーザアブレーションは、その1例である。特に量産で低コストのシステムなど、多くの積層造形システムにベルトドライブが採用されている。

ベルトドライブシステムは、おがくずなどの破片に適切に対応するため、多くの製造プロセスに最適である。また、ボールねじシステムと比べて保守要件がはるかに低い。経時摩耗によってベルトが伸びると、動作の精度と反復性の両方が低下する。ベルトの摩耗は、リードねじのように速度には依存しない。従って、耐用年数はリードねじよりも予測しやすい。ベルトドライブシステムは、長さに対するコストの増加が緩やかであるため、移動距離の具体的な要件に合わせて容易にカスタマイズすることができる（**図7**）。「無限の移動距離」が実現できる再循環ボールベアリングをベルトドライブに組み合わせることにより、長距離ベルトドライブシステムの費用対効果をさらに高めることができる。

適切な組み合わせのモーター、エンコーダ、ベアリング、駆動機構を備えたモーション制御機器を選択することにより、ビジョンシステムの精度、スループット、信頼性、コストに多大な影響を与えることができる。モーション制御機器のさまざまな構成要素のメリット及び制約と、それらの連係動作を理解することが、ビジョンシステムの卓越した性能と競争的な価格の確保につながる。

この3部構成シリーズの最終記事では、2つのケーススタディを紹介し、自動セルイメージングシステムとビジョンガイドレーザエッチングシステムを支えるモーション制御システムが、どのように開発されたかについて詳しく解説する。

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