

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3

マイク・ファッセル

2つのマシンビジョンシステムを例に、パート1と2で説明した、主要なモーション制御仕様と駆動及びベアリング機構に関する知識を、モーション制御コンポーネントの選択に適用する方法について解説する。

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部構成の記事の最終章である。過去2つの記事では、モーション制御機器の主要な仕様と、それらの仕様に影響を与える、さまざまな種類のモーター、駆動機構、ベアリング、エンコーダについて説明した。本稿では、その知識を基に、実際のビジョンシステム設計を最適化する方法を紹介する。ビジョンガイド付きのレーザーアブレーションシステムと高倍率の自動光学検査システムを例に、機能的要件を、各用途に対する理想的なモーション制御

コンポーネントの選択に使用できる仕様に変換する方法について、説明する。

ビジョンガイド付き レーザーアブレーションシステム

電子デバイスのケーシングの金属部品間に信頼性の高い導電経路を設けることが、仕様で定められた電磁放射性能を実現するために不可欠である。非導電性の陽極酸化皮膜をアルミニウム部品から選択的に除去して、部品間に導電経路を設ける処理は、一般的な製造手法である。この処理の自動化は、製造歩留まりとスループットの向上につ

ながる。向きがバラバラの状態の部品集合に対応できるビジョンガイドシステムは、多品種少量生産環境に理想的である。それによって、異なる製品部品ごとに位置決め治具を変更するなどの、時間のかかる多くの設定工程を省き、生産効率を高めることができる。

ファーストパスイールド(直行率)と生産効率に対する所望の改善を達成するために、このシステムのモーション制御コンポーネントが満たす必要のある、主要な機能的要件は以下のとおりである。

- ・重量のあるレーザー走査ヘッドとカメラをX軸とY軸に沿って高速に動かして、レーザー走査ヘッドの200×200mmの走査領域内の対象部品の位置を特定する。
- ・1回のバッチで多くの部品のアブレーションができるように、大きな領域をカバーする。
- ・最適なフォーカスと最大の出力供給を達成するために、対象物の高さに合わせたレーザーのZ軸方向の位置決めを0.1mm精度で行う。
- ・電源停止時にZ軸位置を維持する。
- ・位置決め誤差を自動的に検出して修正する。

機能的要件から コンポーネント選択への変換

レーザーに搭載されている走査ヘッド

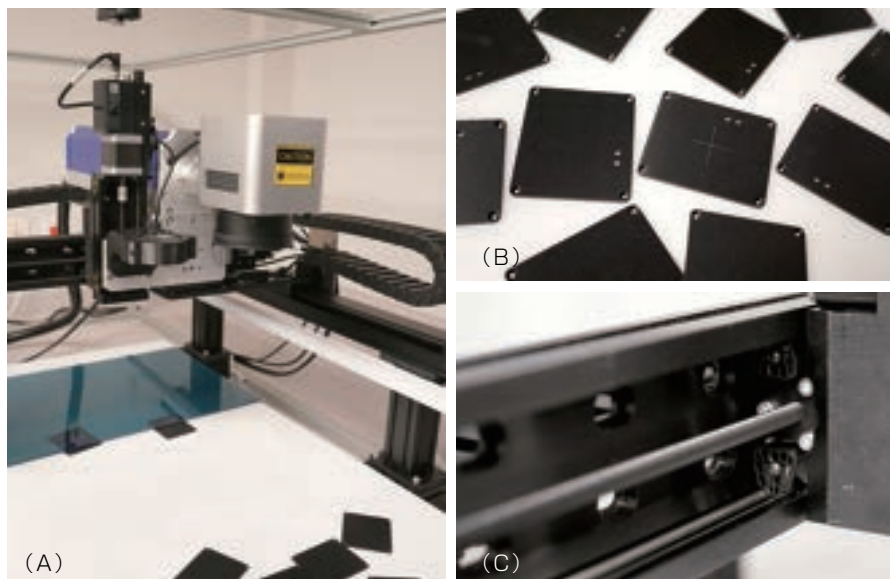


図1 このレーザーアブレーションシステムは、XYガントリーステージ、焦点制御のためのZ軸ステージ、レーザー走査ヘッドと搭載カメラ、リングライトで構成されている(A)。(B)は、高精度レーザーエッチングを施したサンプル部品。(C)は、リードねじと再循環ボールベアリング。垂直ステージの搭載により、カンチレバー負荷が生じる(本稿の写真と図は、ゼイバー社提供)

の200×200mmの走査領域は、システムのターゲットである5mmのねじ穴よりもはるかに大きいため、X/Y軸に対する精度要件は低い。これによって、他の仕様を優先する設計自由度が与えられる。1回の実行で処理できる部品数を最大にするには、大きな作業領域が必要である。従ってX/Yステージには、その作業領域に対応する十分に長い移動距離が求められる(図1(A))。再循環ボールベアリングは、生産環境における移動距離の長いステージに適した選択肢である。大きなカンチレバー負荷を支えることが可能で、耐用年数が長いこと、長期的な保守コストと予期せぬダウンタイムは低減される。再循環ベアリングの周囲にワイパーシールを使用すると、損傷の原因になり得る破片の侵入を防ぐことができる。

次の主要な機能的要件は、速度である。システムは、レーザスキャナと精密ガイダンスカメラを1つのねじ穴から次のねじ穴へと移動させながら、各穴で停止してアブレーション処理を行わなければならない。最大速度と加速度の間の理想的なバランスは、用途ごとに異なる。ターゲットとなるねじ穴の間の距離が短い場合は、最大速度よりも加速度が高いことのほうが、スループットに対して効果的である。固定位置からの高速な加速には、ステッパーモーターが望ましい。低速時にはサーボモーターよりもはるかに高いトルクを生成するためである。また、サーボモーターにはギアボックスが必要で、ステージの複雑さとコストが増大する。リードねじとベルトドライブは、どちらも移動距離の長いステージに対する費用対効果の高い選択肢だが、リードねじ駆動のステージの方がピークスラストが高く(図1(C))、重いレーザ走査ヘッドをより高速に加速できる。

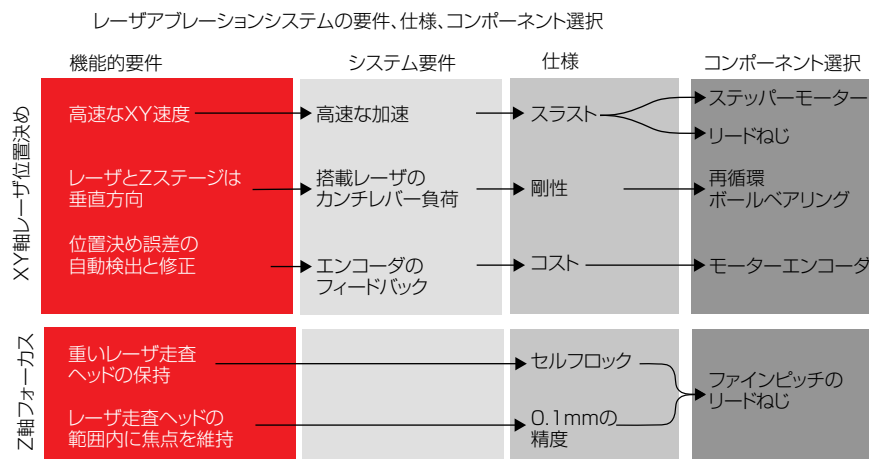


図2 レーザアブレーションシステムの機能的要件とモーション制御コンポーネント選択の関係



図3 標準的な水平方向の場合、ステージに対して推奨される最大負荷は、最大中心負荷の仕様によって定義される(A)。垂直方向の場合は(B)、カンチレバー負荷を考慮しなければならない。垂直方向のステージには、重力に逆らってこの負荷を持ち上げられるだけのスラストが必要である

レーザのフォーカス範囲を絞るには、X/Y軸よりもZ軸に高い位置決め精度が求められる。負荷はステージ上にただ配置されるのではなく、ステージによって持ち上げられるため、ステージの垂直方向について考察する必要がある。この垂直方向において、ステージによって生成されるスラストは、レーザ走査ヘッド、搭載カメラ、照明コンポーネントを合わせた重量を持ち上げられるだけの大きさがなければならない。これについては、ステッパーモーターとリードねじ駆動が、優れた選択

肢である。ステッパーモーターは、サーボモーターよりも低速トルクが高く、リードねじはベルトドライブよりもバックラッシュが小さいためである。

電源停止時にレーザアセンブリがZ軸フォーカス位置を確実に維持するためには、セルフロック式のステージが必要である。リニアモーターは、荷重を保持するには通電状態を維持する必要があり、コースピッチ(粗いピッチ)のリードねじやボールねじ駆動のステージは、逆駆動の可能性がある。従って、ファインピッチ(細かいピッチ)のリード



図4 多軸モーション制御システムのプランニングのための構成ツールの画面例。このようなツールは、ステップバイステップのガイダンスによって、正しいデバイスの選択に加えて、各デバイスを適切な向きに取り付けるために必要となる、すべての配線、支持具、取付具も用意できるように、支援してくれる

ストの抑制につながる。エンコーダのフィードバックは、性能的に余裕のある高額なステージを選択するよりも、ターゲットとするねじ穴を100%処理することを保証するための費用対効果の高いソリューションである。エンコーダは、性能限界近くで動作するシステムの進みや遅れの自動補正が可能である。位置を直接測定する必要はないため、モーターエンコーダが、最も費用対効果の高い選択肢である。システム要件と仕様が定義できたら、加ゼイバー・テクノロジーズ社 (Zaber Technologies) のXYZガントリコンフィギュレータ (図4) のようなオンラインツールを使用して、それらの要件を満たすシステムを簡単に設計することができる。

CIS検査システムの要件、仕様、コンポーネント選択

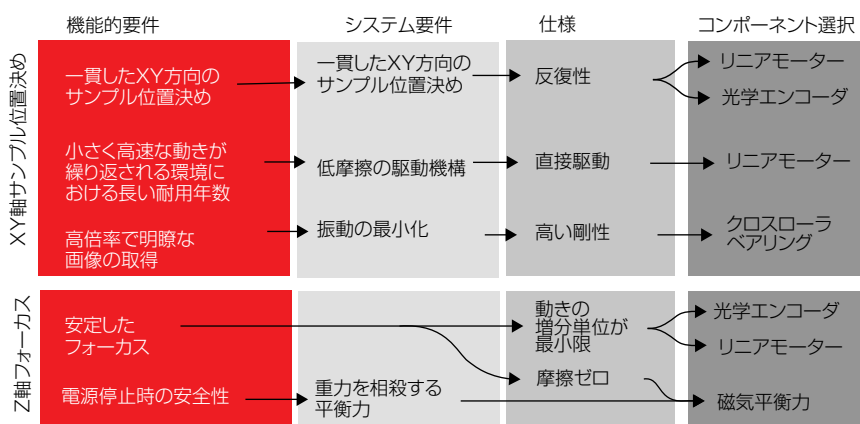


図5 顕微鏡のZYステージの機能的要件とモーション制御コンポーネント選択の関係

ねじ駆動のステージが望ましい。

ステージに垂直方向が加わると、水平方向で使われるステージと比べて設計時検討項目が1つ追加される。このシステムでは、レーザー走査ヘッドとビジョンガイダンスコンポーネントの搭載によって、フォーカスステージのカンチレバー負荷が加わる (図3)。ベアリングがバインドすると、その摩擦でモーターが失速する可能性があるため、それを回避しなければならない。

ローラベアリングまたは再循環ボールベアリングは、カンチレバー負荷の下でプレーンベアリングよりもはるかに高い性能を示す。

価格と性能の間のバランスについても考察する必要がある。システムの性能を必要以上に高くすると、機能的性能に意味のある改善をもたらすことなく、コストを大幅に増大させてしまう可能性がある。機能的要件に近い仕様を持つステージを選択することが、コ

このビジョンガイダンスシステムは、2台の2.3メガピクセル、30fpsのUSB 2.0カメラを使用する。1台のカメラは固定で、システムの上部に取り付けられており、各部品境界を検出する。2台目のカメラはレーザー走査ヘッドの横に取り付けられており、ヘッドとともに動くことによって、レーザーのガルバノスキャナヘッドに精密なガイダンスを提供する。大まかな位置決めを行うカメラの照明は、LEDバーライトによって提供され、精密な位置決めを行うカメラの周囲には、LEDリングライトが取り付けられている。

多くの産業用システムと同様に、このシステムのマシンビジョン/モーション制御要素は、互いに依存して有効な動作を行う。どの要素も他の要素と独立して動作することはできない。大まかなガイダンスを行うカメラからの入力がない場合は、モーション制御システムは、レーザー走査ヘッドと精密ガイダンスカメラの位置決めを正確に行うことはできない。モーション制御がな

ければ、精密ガイダンスカメラとレーザを、処理する部品の上に配置することはできない。これらのシステムの連携動作は、ソフトウェアによって実現される。アプリケーションは、迅速な開発と、要件の進化に応じたシステムの簡単な更新と適応を可能にするために、Pythonで実装されている。画像解析は、OpenCVを使用して実行されており、モーション制御には、Zaber Motion Libraryが使用されている。

高倍率の自動光学検査システム

CMOSイメージセンサ(CIS)のような半導体デバイスには、正しく動作することと、その製造に使われる材料やプロセスが定められた公差の範囲内に収まっていることを確認するために、非常に厳しい品質管理プロセスが適用される。半導体デバイスの検査には、ミクロンレベルのフィーチャをはっきりと確認するために、高倍率の光学系が必要である。そうした小さなフィーチャを一貫して特定するには、高精度なモーション制御が必須となる。

ゼイバー社のMVR自動顕微鏡に基づくCIS検査デモシステムを構築した。このシステムは、小型部品の少品種大量検査用に最適化されている。これは、大型の多品種少量システムにおけるコンポーネント選択に適用されるものと同じ原則が、それとは正反対のシステムにも適用できることを示す例である。

高スループットの生産環境において、CIS上のミクロンレベルのフィーチャの直ちに利用可能な画像を取得するには、以下の機能的要件を満たす必要がある。

- ・ CISと対物レンズの間の距離を一定に保つことにより、部品のエリア全体にわたってフォーカスが一定に保たれるようにする必要がある。
- ・ システムは、高スループット環境に

おける連続稼働に対し、長い耐用年数を持つ必要がある。

- ・ 自動画像解析を簡素化するために、センサ上の主要フィーチャの位置を確実にとらえる必要がある。
- ・ システムは、鮮明で明瞭な画像を撮影する必要がある。
- ・ 電源が停止しても、対物レンズが破損することがあってはならない。

機能的要件から コンポーネント選択への変換

高倍率光学系を搭載する検査システムは、固有の課題をビジョンシステム設計者にもたらす。これらのシステムは、振動に非常に敏感である。1 μ m未満という浅い被写界深度により、正確な焦点の検索と維持は、標準のマシンビジョン光学系よりもはるかに難しくなる。

高倍率で鮮明な画像を撮影するには、振動によって生じるモーションブラー(被写体ブレ)を最小限に抑えることが不可欠である。振動は、機械的剛性の高いコンポーネントを選択することによって、低減することができる。高倍率の用途には、クロスローラベアリングが推奨される。再循環ボールベアリングやプレーンベアリングよりも剛性と反復性が高いためである。高剛性コンポーネントは、摩擦も非常に低くて一貫しており、これによって振動を最小限に抑えることで、検査位置を動かした後や次の検査部品をシステムに配置した後に、システムのセトリングに必要な時間が短くなり、イメージングスループットを大幅に高めることができる。

システムの動きの間のセトリングが高速であるほど、高いスループットが得られる。クロスローラベアリングは剛性が高いため、焦点が一度定めれば、

対象物のエリア全体にわたって正しい焦点距離を維持することが可能で、システム性能も高くなる。セトリング時間が高速であれば、より安価なローリングシャッターカメラで歪みのない画像の撮影が可能で、高価なグローバルシャッターカメラを使用する必要がなくなるため、コストの削減にもつながる。

数千個もの検査対象物に対して、一貫して同じポイントを撮影するには、非常に高い反復性が必要である。ゼイバー社のX-ADRシリーズのように、位置フィードバック用のナノメートル精度の光学エンコーダを搭載するリニアモーターXYステージを使用すれば、1個目から百万個目の検査部品まで、一貫性に優れた結果を得ることができる。動きの最小増分単位が小さいステージほど、より小さな位置補正が可能であるため、位置フィードバックを最大限に活用することができる。円滑で低摩擦のクロスローラベアリングと、低摩擦でバックラッシュのないリニアモーターを組み合わせることにより、20nmという最小増分単位の動きが実現可能で、24時間年中無休で稼働する高スループットの用途に対しても、一貫した結果を保証することができる。

予期せぬダウンタイムを最小限に抑えることは、産業プロセスにおいて重要なことである。ステッパーモーター駆動のステージとは異なり、リニアモーターは、リニア動作を直接生成し、回転動作をリニア動作に変換するための機械部品を追加する必要がない。これによって、摩擦、バックラッシュ、機械的摩擦の原因が取り除かれ、非常に長い耐用年数が得られる。この例のように、ターゲットのイメージング位置の間で小さく高速な動きを繰り返しながら、高スラストで連続的に稼働するシステムに対しては、これは重要な

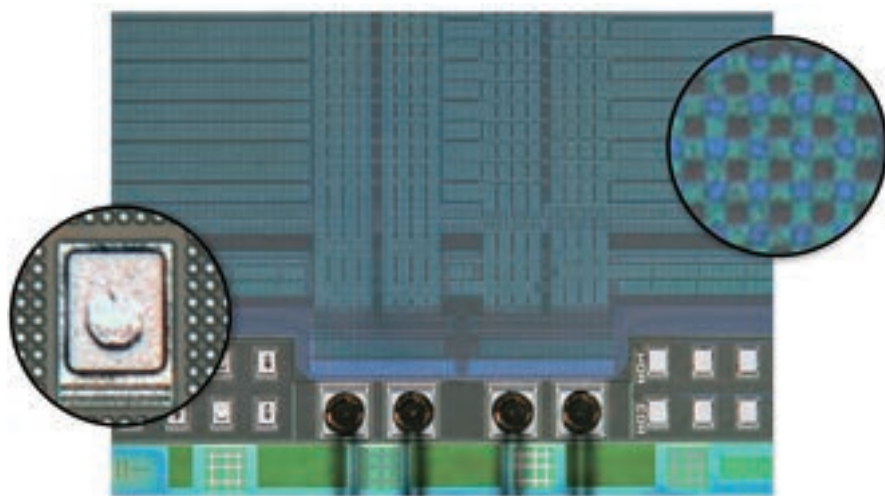


図6 CMOSイメージセンサのエッジを20倍拡大して、センサダイに対するワイヤボンディングと、 $2.74\ \mu\text{m}$ ピクセルのベイヤー配列のカラーフィルタを示した様子

ことである。

広いエリアにわたって優れた細部を示すことのできる高い分解能と大きなセンササイズを備えていることを理由に、ソニーのCMOSイメージセンサ「IMX428」を搭載する、加テレダインFLIR社 (Teledyne FLIR) 製の24.5メガピクセルカメラ「BFS-U3-244S8C-C」を選択した(図4)。反射型暗視野照明は、ゼイバー社の「X-LCA4」照明コントローラと「MLR3B LED」落射照明装置によって提供されている。対物レンズは、米ツァイス社(Zeiss)の「EC Epiplan 20x/0.25 HD」である。モーション制御と画像取得の自動化は、「 μ Manager」ソフトウェアによって実現されている。

正確な焦点制御は、XY位置決めステージと同じ要件を多く共有する。一貫した焦点制御には、動きの最小増分単位が小さいことと、反復性が高いことが求められる。これらの要件は、リニアモーターの能力にまさしく合致す

る。クロスローラベアリングは、高い剛性と円滑な動きによって、振動を最小限に抑えて、反復性に優れた動きを実現するため、ここでの理想的な選択肢である。

先ほどのレーザアブレーションシステムと同様に、フォーカスステージの垂直方法について考察する必要がある。リニアモーターは、荷重を保持するために通電状態を維持する必要があるが、セルフロック式のリードねじステージでは、必要な反復性、バックラッシュ、動きの最小増分性能が得られない。この問題は、平衡力によって重力を相殺し、電源停止時にはステージを静かに低下させることにより、解決することができる。ゼイバー社の「X-LDA-AEZ」で提供されているような調整可能な磁気平衡力は、操作が容易で、決して摩擦することがなく、摩擦

を全く生じないため、ステージの正確性や反復性に影響を与えない。

顕微鏡法を利用する多くの用途で、最適な焦点を素早く見つけるためにオートフォーカスシステムが使われている。ソフトウェアベースのほとんどのオートフォーカス手法で、異なるZ位置で一連の画像を取得してから、最もコントラストの高い画像を選択することが行われている。一般的にこれは、最適な焦点位置を行き過ぎてから戻すことを意味する。両方向から対象物に近づく操作で高い反復性を必要とする用途に最も適しているのは、バックラッシュが実質的にゼロのリニアモーターである。光学エンコーダによって位置フィードバックを提供することにより、反復性をさらに高めることができる。オートフォーカス性能をさらに改善するには、IOトリガをサポートするコントローラを内蔵するフォーカスステージを選択するとよい。そのようなステージの1つであるゼイバー社の「X-LDM」シリーズは、カメラのデジタル出力ラインを介して、次のZ位置に直接移動するようにトリガ可能である。

2つの全く異なるマシンビジョンシステムを例に、パート1で説明した主要なモーション制御仕様と、パート2で説明した駆動及びベアリング機構に関する知識を、各システムの機能的要件に最も適したモーション制御コンポーネントの選択に適用する方法を示した。ビジョンシステム設計者が、仕様間のトレードオフのバランスを図り、性能目標を満たす費用対効果と信頼性に優れたシステムを構築するために、十分な情報に基づいて意思決定を行う上で、この知識が役立つだろう。

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