

マイクロメートルスケールの精度： 高スループットレーザ穴あけシステムの エラーバジェット解析

ブライアン・ジャーマン、エリック・ベルスキ

レーザによるビア穴加工で、生産スループットと加工品質の両方の目標を同時に達成する装置を設計するために、どのようにしてシステム全体の誤差を特定して低減すればよいのか？

高速レーザ穴あけ加工において、マイクロメートルスケールのスポットサイズ精度を達成することは、生産量と品質に対するエンドユーザーの要件を満たす装置を構築することを目指す機械メーカーにとっての設計課題である。エレクトロニクスや半導体パッケージングなどの業界では、さらに小型で複雑なスルーホールパターン（一般的

に「ビア」と呼ばれる）に対する需要が高まっている。このような小さなビア公差を達成するには、穴あけ加工時に複合的に作用する誤差源を深く理解することが必要である。

さまざまな誤差源が全体的なシステム精度に影響を及ぼすため、数千から数百万もの穴がある大型基板において、それらの相互作用がビアの位置精

度とビアの形状公差の総合公差に与える影響を調べる必要がある。これらの誤差源は、部品ハンドリングの機械設計や、穴あけ加工を行うために用いられるレーザビーム光源、光学系、ビームステアリングシステムに起因する場合がある。

エラーバジェットを解析する： 発生源と相互作用

エラーバジェット解析とは、レーザが加工対象物に接触する機能点における累積誤差を予測することを目的に、装置のすべての誤差源を特定、定量化、追跡する体系的なプロセスである。多軸レーザ穴あけシステムの場合、これらの誤差の主な2つの発生源は、部品を移動させる機械式ステージと、レーザビームを移動させる光学系およびスキナである。モーションプロファイルのダイナミクス（図1）と位置決め後のレーザのトリガリングによって生じる二次誤差も、全体的なエラーバジェットに寄与する。

機械的モーションの誤差。加工対象物や光学系を移動させるサーボ駆動ステージは、装置の基盤となるものであり、これに内在する幾何学的誤差は、エラーバジェットに影響を与える主要因である。装置の中のすべてのモー



図1 グラナイト上にステージを直接統合した分割軸線形モーションシステムと、高ダイナミックの2軸ガルバノスキャナヘッドで構成される、ハイダイナミックモーションシステムの例(画像提供:エアロテック社)

ション軸が、6自由度のすべてにおいて誤差の影響を受ける。X軸に沿って移動する単一の線形ステージの場合(図2)、これには、3つの線形誤差(位置決め精度、水平真直度、垂直真直度)と3つの角度誤差(ロール、ピッチ、ヨー)が含まれる。これらの寄生モーション、特に角度成分は、加工面におけるレーザビームの変位を引き起こす、大きなアッペ誤差(Abbé error)を生成する可能性があり、その影響は、モーション軸から加工対象物までの距離に応じて増幅される。

ガルバノスキャナと光学系の誤差。
ガルバノスキャナは、非常に高速で機敏である一方で、固有の誤差をもたらす。 $f\theta$ レンズは、スキャナの角運動を平らな焦点面に変換するために用いられるものだが、完璧ではなく、ピックアップ歪みやバーレル歪みとして知られる空間的非線形性を引き起こす(図3)。さらには、レーザビームそのものが、不安定性の要因となる可能性がある。レーザ光源内部または光路上の温度ドリフトにより、長い生産工程において焦点のずれやビームの揺らぎが生じる可能性がある。汚れた光学部品などの環境的要因も、焦点スポットサイズの拡大や、ビームのエネルギー分布の変化を引き起こして、性能を低下させる可能性があり、これは、穴の品質と均一性に直接的な影響を及ぼす。

誤差の測定と補償

何らかのモーションが生じる前に、システムコンポーネントの測定と較正が行われる。これらは一次誤差源とみなされ、モーションコンポーネントのフィードバックデバイスによって検出できないため、補正しておかなければ、レーザを正しい位置でトリガることができない。

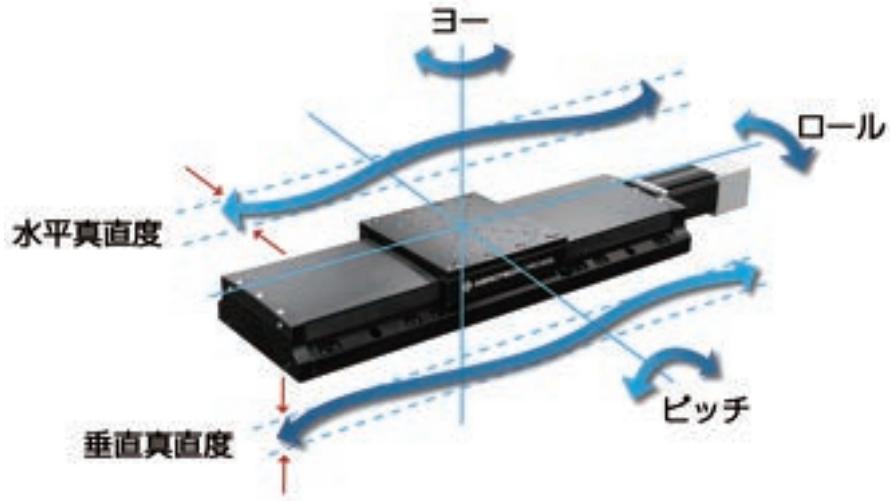


図2 垂直および水平方向の真直度を表す線形モーションステージの誤差源と、平面度の誤差源であるロール、ピッチ、ヨー

1D/2Dのステージ較正。レーザ干渉計を使用して、所望の加工点における各ステージの位置誤差を全移動範囲にわたって測定する。このデータは、各軸のキャリブレーションテーブルを生成するために用いられる。このテーブルは、線形位置決め誤差だけでなく、真直度、ピッチ、ヨー、非直交性のような軸間誤差を補正するために、リアルタイムに参照される。これによって実質的に、実際のステージは、理想的な理論上の動作と同じように動作し、ステージが移動範囲を移動する間に、加工点のアッペ誤差が測定時に自動的に補正される。

スキャナ較正。「mark-and-measure」(マークして測定)の較正を行うことにより、 $f\theta$ レンズに伴う光学誤差を正確に測定することができる。スキャナに対し、既知の位置からなる正確なグリッドにマークを付けるように指示する。続いて、システム内に配置された高解像度カメラによって、それらのマークの実際の位置を測定し、差分を、モーションコントローラ内に格納され

るキャリブレーションテーブルの位置オフセットとして収集する。このスキャナ較正により、視野(FOV)全体にわたる $f\theta$ レンズの歪みとその他の非線形性が補償される。

レーザビームの集光に用いられる特定の $f\theta$ 対物レンズにおいて、レーザスポットサイズと形状がFOV全体でどのように変化するかを特性評価することも重要である。これはプロセスパラメータに影響を与える可能性があるためである。このようなスポットサイズ誤差も、「mark-and-measure」プロセスの一環として測定でき、レンズの作動距離を動的に変更することによってスポットに焦点が合った状態を維持し、レーザ出力を変化させることによってレーザフルエンスを一定に保つことにより、較正できる。

静的な較正は不可欠だが、機械システムの慣性に起因するトラッキング誤差によってレーザスポットがずれる可能性のある、高速動作時に発生する二次動的誤差を補正することはできない。ステージの移動中は特にそうであ

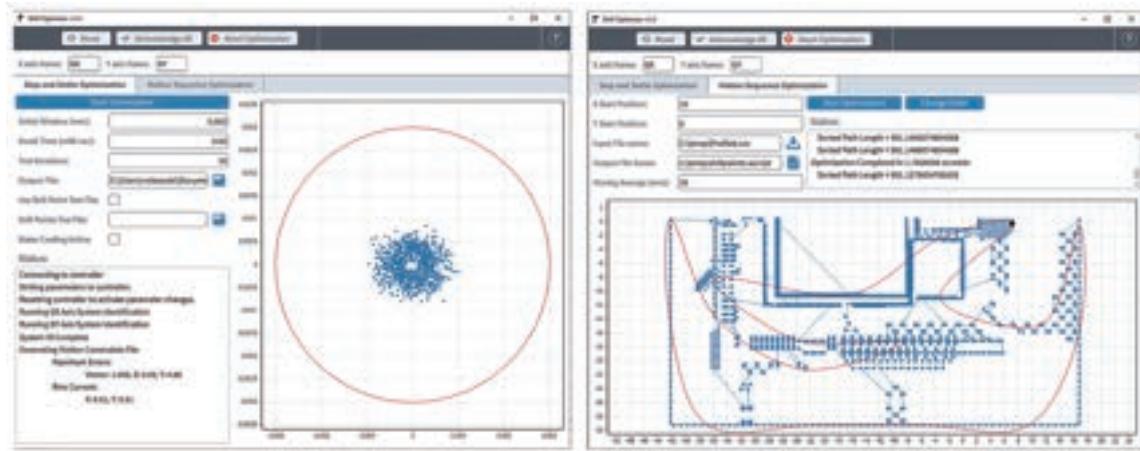


図3 エアロテック社のソフトウェアツール「DrillOptimizer」は、穴あけポイントの間の最短経路の最適化(右)と、特定のスキャナハードウェアに対するチューニングパラメータの最適化(左)を行い、穴あけ時の性能を最大化して誤差を最小化することができる

る。ステージの質量が非常に大きいためである。このような場合は、レーザスキャナヘッドの高いダイナミクスを活用して、より高いスループットを実現することが最善策である。従来の穴あけ方法では、ステージが所定の位置に移動し、整定(セトリング)した後にスキャナを作動させるため、処理が遅く、スキャナの移動に伴ってそのFOV境界で品質の欠陥が生じる。

無限視野 (Infinite Field of View: IFOV) は、この制約を取り除く技術である。この技術は、スキャナの高周波制御ループ(例えば200kHz)とステージのサーボループ(例えば20kHz)を同期的に管理する、統合制御アキテクチャ上で動作する。IFOVは、ステージからのライブのエンコーダフィードバックをスキャナの制御ループへの直接入力として使用するため、スキャナは、自らの軌道を動的かつ連続的に調整して、ステージの実際の位置を追跡および補償することにより、実質的にステージのトラッキング誤差をリアルタイムに相殺することができる。

その結果、単一のシームレスなツールパスが得られて、加工対象物全体にわたる連続的な「オンザフライ」の加工が可能となり、スティッキングエラーがなくなる。

非常に動的なIFOVシステムにおいて、速度は常に変化している。固定時間間隔でレーザを照射すると、ビアの間隔は不均一になる。位置同期出力 (Position Synchronized Output:PSO) は、エンコーダのリアルタイムの統合されたIFOV位置を使用して、高精度な空間的間隔でレーザをトリガすることにより、この問題を解決する技術である。これによって、モーション速度が変化しても、各レーザパルスまたはバーストが加工対象物上に正確に照射されることが保証される。これは、正確なビアピッチを維持するために非常に重要なことである。

エラーバージェット解析に対する検証済みのアプローチ

これらの独立した誤差源がどのように合算されるかを理解することが重要

である。ピーク誤差を単純に合計すると、「ワーストケース」の値が得られるが、この値は過度に保守的で、不必要に高額な設計につながる。より実用的で統計的に妥当な方法は、二乗平方根(Root Sum Square: RSS)のアプローチを採用して、相関のない誤差を合計することである。

この方法の妥当性は、エアロテック社のウィリアム・ランドII(William Land II)とスコット・シュミット(Scott Schmidt)による詳細な研究によって確認されている⁽¹⁾。両氏は一連の高精度測定を行って、システム性能を綿密に定量化した。まず、二次元(2D)レーザ干渉計システムを使用して、基盤の線形モーターサーボステージを較正した。このプロセスにより、ステージのヨーや非直交アライメントなどによって生じる静的誤差を除去した補正マップを作成した。その後、反復的な「mark-and-measure」技術を使用して、ガルバノスキャナヘッドアセンブリを独立して較正することにより、その誤差寄与を補正した。

この試験によって得られた以下の定量化された結果が、明確なベンチマークとなる。

- ・較正後のサーボステージの残余ベクトル和誤差は $5.26\mu\text{m}$ だった。
- ・較正後のガルバノスキャナシステムのベクトル誤差は $2.06\mu\text{m}$ だった。

RSS法を適用すると、合計誤差の予測値は、 $5.262\mu\text{m}$ （ステージのみ） $+2.062\mu\text{m}$ （スキャナのみ） $=5.65\mu\text{m}$ （RSS合計誤差）となる。これを検証するために、ステージとスキャナが同時に逆方向に動いて基板上にマークを生成する、ランダムな複合モーションのグリッド試験を行った。この動的試験で経験的に得られた合計誤差の測定値は $5.44\mu\text{m}$ だった。予測値と測定値の間の相関性が高いことから、適切に算出されたエラーバジェットによって装置のベースラインとなる準静的性能を正確に予測できるという高い確信度が得られる。これは、適切なシステムを構築するために不可欠な最初の一歩である。

高度な制御ループ最適化

IFOVとPSOを適用して完全に較正したシステムであっても、最終的な性能は、制御システムそのものの応答性によって制限される可能性がある。標準的なPID（Proportional Integral Derivative：比例・積分・微分）制御ループは、フィードフォワードゲインで強化した場合でも、通常は、汎用的な「平均」移動プロファイルに合わせてチューニングされる。この単一のチューニングプロファイルは、妥協点を表す。

スキャナの短くてアグレッシブな移動に対する最適な制御ループゲインは、長くて滑らかな移動に対する最適ゲインとは根本的に異なる。最大限のスループットを引き出すには、シス

トムは、加速、移動、各目標位置での整定を、必要最小限の時間で完了しなければならない。

エアロテック社の「DrillOptimizer」（図3）など、高度なモーション最適化ソフトウェアは、反復的な機械学習および強化学習アルゴリズムを使用してこれを実行する。このプロセスは、次の処理で構成される。まず、FOV内の異なる長さと向きの移動に対するガルバノスキャナシステムの動的応答の特性評価を行う。次に、想定しうるあらゆる移動動作に対する最適なPIDおよびフィードフォワードチューニングパラメータの包括的なライブラリを構築する。そして、リアルタイム動作中にビアからビアへと移動する度に、コントローラはその特定の移動ベクトルに最適な制御パラメータセットを瞬時に取得して適用する。

移動に特化したこの最適化により、各移動動作は、求められる安定性範囲（例えば $\pm 2\mu\text{m}$ ）に必要最小限の時間で整定することが保証される。これにより、レーザは移動遅延ゼロで照射可能となり、物理的なハードウェアの性能は絶対的な限界まで押し上げられ、スループットは従来の方法でチューニングされたシステムが達成可能な範囲を超えて最大化される。エアロテック社は、当社のAeroscriptPlusライブラリの一部であるDrillOptimizerというソフトウェアパッケージに、これを行う一連のツールを統合している。機械メーカーは、これらのライブラリを活

用することで、この種の強力な移動および整定最適化機能を装置のヒューマンマシンインターフェース（HMI）に直接組み込み、この複雑な最適化機能をすべての顧客プロファイルに追加することができる。

レーザ穴あけシステムの装置設計者のための重要ポイント

レーザによるビア穴あけが可能な装置を一から設計する作業は、複数の段階からなるプロセスである。最初に、システムのベースライン精度を理解するために、基礎的なエラーバジェットを綿密に算出して経験的なデータによって検証する。次に、この計算結果を、ステージの静的な2D較正から、IFOVによる動的なリアルタイム誤差補正やPSOによる正確なパルス配置に至るまでの、補償方法の包括的なツールキットによって最適化する。最後の重要なステップは、移動動作に特化した高度な制御ループの最適化によって、ハードウェアの最大限の可能性を引き出すことである。

この統合戦略により、最新のレーザ穴あけ加工の非常に厳しい要件を満たすことが可能となる。プロセスの各段階におけるあらゆる誤差源を理解し、考慮し、積極的に補償することが、毎秒数千箇所でマイクロメートルレベルの安定性範囲を維持することにつながる。これは、膨大な規模の製造課題を高スループットの現実に転換するものである。

参考文献

- (1) S. Schmidt and W. Land II, "Estimating combined servo and galvo motion accuracy," Aerotech white paper (Dec. 2021); see www.aerotech.com/estimating-combined-servo-and-galvo-motion-accuracy.

著者紹介

ブライアン・ジャーマン（Bryan German）は米エアロテック社（Aerotech）の製品マネージャー、エリック・ベルスキ（Eric Belski）は同社レーザ応用ラボマネージャー。URL:www.aerotech.com