

# 高精度スキャニングシステムにおける熱影響の管理方法

スコット・シュミット

## ガルボスキャナで、全体的なスループットを大幅に改善

どのようなモーション制御でも確実に成功させるには、多数の重要な設計細部に気を配らなければならないというのが、高精度エンジニアリングの一般原則である。たとえば、機械加工や組み立てにベストプラクティスを適用すれば、高性能システムが構築される可能性は最大限に高まるし、安定した動作環境を維持するには特別な注意を払う必要がある。特に熱影響の管理と緩和は、何よりも重要なことである。

ガルボメータ（ガルボ）スキャナは、レーザ微細加工や積層造形（AM：Additive Manufacturing、付加製造）において利用が増加している（図1）。帯域幅が非常に広いことから、従来のサーボステージ構成（「固定ポイント」のレーザシステムなど）よりも高速な処理が可能で、全体的なスループットを大幅に向上させることができる。システムの加熱とそれによるひずみを管理

することの重要性は、サーボ駆動のステージ、アクチュエータ、システムにおいて昔から十分に理解されているが、それと同程度の対策では、最新の高速スキャニングにおける類似の影響に対処できるとは限らないのが実情である。しかし、ガルボメータ・システムの加熱の根本原因を調査すれば、この問題を管理して、全体的なシステム性能を高めるための最良の設計方法に関する直接的な洞察を得ることができる。

ステージベースのシステムにおける熱ひずみは通常、ステージそのものの膨張にともなって生じる。熱源となるのは一般的にステージモーターで、その影響は、非線形である場合が多いものの、測定可能で、緩和できる可能性もある。たとえば、温度センサを適切に配置すれば、モーション・コントローラによって温度変化を直接測定し、命令で指示したモーション・プロファイル

を変更することによって、ステージの膨張や収縮を補償できる場合がある。一方、スキャニングシステムにおける熱ひずみへの対処は、それほど単純明快ではない。熱源（とその緩和対策）は、必ずしもそれと同じではないからである。具体的な熱源と、それに対して提案される対策を紹介する前に、まずは、スキャニングシステムにおいて熱影響を最も受けやすい構成要素について説明する。

## スキャニングシステムの構成要素

スキャニングシステムが加熱することによる最も明白な悪影響はおそらく、ガルボモーター／ミラーを収容してそれらを互いに適切な位置に固定する、アルミニウム製ブロック／筐体（以下、固定ブロック）のひずみだろう。しかし、後ほど説明するが、熱源は必ずしも明白ではないので、それを緩和するには、多数の設計手法を適用しなければならない場合がある。固定ブロック上に温度差が生じると、ミラーの相対的な位置がずれ、多数の非線形の「ドリフト」誤差が生じて、確立した性能や校正結果からのずれが生じる。

モーターの加熱は、明らかな問題である。モーターの巻線は、温度が一定以上上昇すると、完全に破損してしまう。また、過熱によってミラー固定部が緩んで破損すると、少なくともシステムの剛性と応答が変わり、ミラーが完全に外れた場合は、壊滅的破損につながる恐れさえある。

ガルボモーター内の位置センサ（光

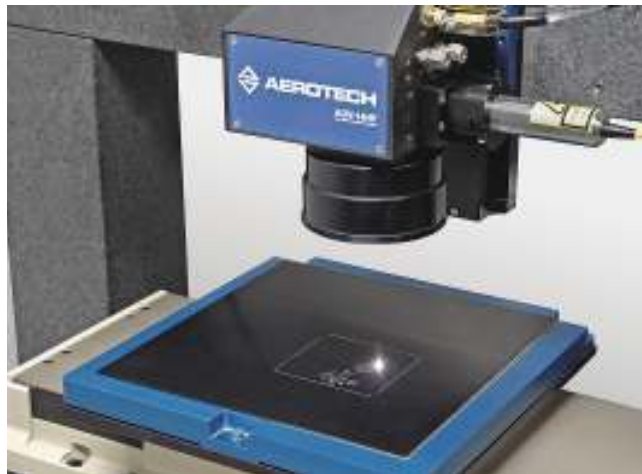


図1 ガルボスキャナは、帯域幅が非常に広いことから、より高速な処理が可能で、レーザ微細加工や積層造形における全体的なスループットを向上させることができる。

学式エンコーダやそのほかの種類のアナログ光学デバイスである場合が多い)も、温度変化にともなって一般的に非線形の動作を示す。その性能低下は、熱または時間に起因するドリフトにともなって現れ、全体的なシステム誤差の主要要因である場合が多い。

最後に、ミラーコーティングの反射率そのものも、温度に依存する。室温において、あるレーザ波長に対して最適化されたコーティングは、温度が高くなると効率が低下する場合がある。反射率のピーク位置は、 $\lambda$ の値が高くなるとずれる傾向にあるためである。

もう察しがついただろうと思うが、上述の問題に対する解決策は、熱影響そのものと同様にまちまちなのである。

スキャナのミラーは、レーザエネルギーによる過熱の影響を直接的に受ける。ミラーコーティングは効率が非常に高くなるように作成されているが(一般的に、対象波長における反射率は99.5%以上)、入射レーザエネルギーの一部は、ミラーによって熱として吸収される。この加熱によって生じるシステム全体の熱ひずみに加え、あまりに多くのエネルギーを吸収すると、ミラー固定部が破損し、モーターから外れてしまう可能性がある。

この熱源に対する対策としては、より大きなミラーを使用すること(そうすれば、一定のエネルギー吸収による加熱効果が抑えられる)か、ミラー背面に空気冷却機構を設けて熱を排出することなどが挙げられる。このような冷却機構により、レーザエネルギーに対するミラーの処理能力は3倍以上高まるが、空気がミラーに当たることによって、ミラー位置に少しぶれが生じる可能性がある。さらに高い反射率(99.8%以上)を達成するカスタムコーティングも利用できるが、そうすると、



図2 スキャニングシステム用の水冷却回路の例。

高額な経常外費用がかかり、リードタイムも長くなってしまふ場合が多い。

ガルボ固定ブロックそのものに入射するレーザエネルギーも、スキャニングシステムの主要な熱源である。自由空間を伝搬するほとんどのレーザビームが、ガウス分布に従ってエネルギーを放射する。ビーム径は、光強度が最大値の「 $1/e^2$ 」になるときの幅と定義される。この値(ガウス分布における最大値の約13.6%に相当)から、ビームエネルギーの約4.4%は、公称ビーム径の範囲内に含まれていないことがわかる(また実際、ガウス分布の裾部分は無限に減衰していく)。たとえば、公称ビーム径14mmのビームを開口部が14mmのガルボ筐体に照射すると、ビームエネルギーの4.4%は、アルミニウム製ブロックの加熱に使われることになる。また、ビームの位置がずれていると、さらに多くのレーザエネルギーが、ブロックの入力開口部を通して照射する代わりに、筐体そのものに入射してしまう。

当然ながら、入射ビームの位置を完璧に調整すれば、この熱をいくらか緩和することができる。エアリーディスク(または「トップハット」)を持つレーザを使用することにより、出力分布が均等であればこの影響をほぼ取り除く

ことができる。冷却回路を実装するのも有効な解決策である。水冷却回路を適切に設計して、ビーム入力開口部から熱を排除するようにすれば、特に効果的である。実際、水冷却を適用すれば、システムから熱を除去できるだけでなく、ガルボそのものに加熱の問題がない場合であっても、安定した動作温度を維持することができる。外部の影響因子(隣接する電源やそのほかの実験装置など)によって、管理できないほどの量の熱が放出される場合に、ガルボノメータ内に水冷却回路があれば、スキャニングシステムにある程度の耐熱性を持たせることができる。環境に悪影響を及ぼすほかのデバイスが存在したとしても同様である(図2)。

水冷却を実装すれば、それ以外にも優れた効果が期待できる。ビアの穴あけなど、非常に高い出力を要する処理を行う場合、モーターは、過度なデューティ比で高い加速度で動作するように指示される。これによって、モーターの巻線にはかなり大きな電流が流れ、その結果生じるI<sup>2</sup>R損失が、システムの熱源となる。これは、「スカイライティング」、コーナー・ラウンディング、速度プロファイリングといった、モーション・プロファイルの最適化を適切に利用することによって、管理でき

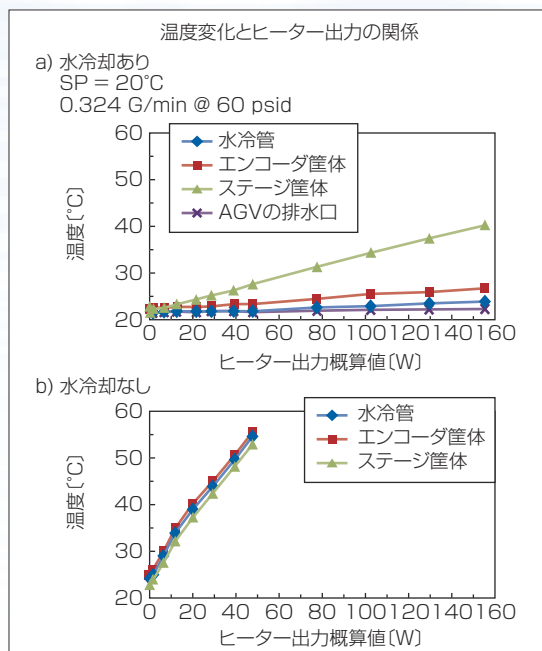


図3 適切に設計された水冷却回路(a)は、それを持たないシステム(b)と比べて、システムの熱安定性の管理に極めて高い効果を発揮する。

っている。熱源を慎重に評価することにより、温度問題の要因に対して候補となる対策を絞ることができる。そうした作業は最終的に、ガルボノメータのより正確なモーションにつながり、スキャニングシステムからのより高精度な部品の製造につながる。

温度が徐々に変化すること(「ドリフト」)によっても、同様に悪影響が生じる。比較的小さな熱源であっても、システムの安定性に著しい影響を及ぼす恐れがあるので、できる限り安定した環境を維持するためのあらゆる対策を検討する必要がある。

本稿では、最も一般的な熱問題の一部に対処するための方法について説明したが、こうした問題に完全に対処するには、はるかに高度な対策が必要である。たとえば、システムをその熱再現性(熱に起因する誤差がどの程度再現可能であるか)によって特性評価することにより、その影響を本質的に校正することができるかもしれない。何を学習すれば、熱ひずみに対する耐性が最も高い固定ブロックを設計するための指針につながるだろうか。ガルボ・フィードバック・デバイスに対してどのような設計を選択した場合に、システム全体の耐熱性にどのような影響が生じるだろうか。ある技術のほうがほかの技術よりも優れているということはある。システム温度の変化に応じてスキャナ・コントローラのデジタル制御アルゴリズムを変更することにより、熱による性能低下に対処することができるだろうか。今後の調査と解析は間違いなく、こうしたダイナミックシステムの精度と性能の向上につながるだろう。

る可能性がある。こうした手段は、一部の高度なモーション・コントローラに搭載されており、モーション・プロファイルにおける加速度の二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)値を引き下げ、それによって、モーター巻線に対して指示されている電流を低下させることができる。

あるいは、レーザ入力開口部を冷却するのと同じ回路で、ガルボモーターの水冷管を流れる液体も冷却し、熱暴走が発生する前に熱を除去することができる。適切に設計された水冷却回路は、システムの熱安定性の管理に極めて高い効果を発揮する(図3)。

モーターの冷却が必要になるほどの大電流を引き起こすモーション・プロファイルを持つ用途は多くないが、水冷却は、高ダイナミックのスキャニングシステムにおいて、かなり一般的になっている。その理由は、おそらくあまり直感的なものではない。ガルボモーター巻線における抵抗損失に起因する熱に加えて、ガルボ固定ブロックに収容されたパワーアンプから、かなり

の量の熱が放出される(実際、モーターの損失よりも大きい場合が多い)。最新式のスイッチモード電源は、効率が高いが理想的ではなく、スループット出力の約10~15%を、熱として損失する場合が多い。

図3から推測されるように、冷却された固定ブロック内の温度を大きく上昇させるには、ガルボモーターの損失よりもはるかに大きな出力損失が必要になる。ここから導かれる興味深い結論は、固定ブロックからパワーエレクトロニクス部品を完全に排除したスキャナ設計を検討するとよいということである。そうすれば、水冷却さえも不要になり、控えめに言っても、はるかに高い安定性が得られる。

### 今後の検討事項

さらに高精度なレーザスキャニングシステムの普及にともない、環境の制御と考察を重視することが不可欠とな

#### 著者紹介

スコット・シュミット(SCOTT SCHMIDT)は米エアロテック社(Aerotech)のアプリケーション・エンジニアリング・マネージャー。email:sschmidt@aerotech.com URL:www.aerotech.com