

レーザ微細加工に向けた、ガルバノスキャナ MHz スケール繰り返しレート達成

ホルガー・シュリュタ、ビート・イエギ、ビート・ノイエンシュヴァンダー、マルクス・ツインマーマン

アブレーション効率を最大化し正しいピークフルエンスを選択することで、高スループットと高品質レーザ加工工程の両方が可能になる。

極めて精密な加工能力がある超短パルス (USP: 超高速とも言う) レーザが利用できるようになって、レーザ微細加工能力が拡大した。しかし、USP 利用で高スループットと高品質レーザ加工の最適化となると、新たな要素を考慮に入れなければならない。まず、アブレーション効率、すなわち分当たり、ワットあたりの立方ミリメートルに固有の除去速度のことであるが、この効率が最大化されなければならない。特に、良好な表面品質を達成するには、ピークフルエンスが正しく選択される必要がある。

パルスエネルギーとスポットサイズ増加

時間当たりの体積という観点からアブレーションを増大させる素朴なアプローチなら、単純に平均パワーを増やせばよい。しかし最高の加工品質を保つには、平均パワーは、レーザパルス繰り返しレートとともに増やさなければならない、つまりアブレーションエリアが最適ポイントでレーザピークフルエンスを維持していなければならない。さらに、良好な加工品質は、パルスとパルスとの距離、つまりピッチが $1/2 \sim 1$ スポット半径の範囲になければならない、言い換えると1パルスが約75%重なっていなければならない。所定のピッチ p と1スポット w_0 ではオーバーラップ o は、次のように表される。

$$V_{scan} = f_{rep} \times 2 \times w_0 \times (1 - o)$$

現在利用できる USP レーザシステムでパルス繰り返しレートの動作範囲は、1ケタメガヘルツの範囲にある。結果として、適切なパルスオーバーラップを維持するには超高速スキャン速度が必要になる。図1は、スポット半径 $w_0 = 6 \mu\text{m}$ と繰り返しレート最大 $f_{rep} = 10 \text{MHz}$ に対して計算したスキャン速度を示している。

テストセットアップと最初の成果

使用したレーザシステムは、米勒メンタム社 (旧 Time-Bandwidth Products) のモデル Fuego で、パルス幅は 10ps。レーザからの光は、円偏向を生成する $\lambda/4$ 波長板を通り、4つのミラーでスキャナ開口部に導かれる。スキャナ前面にビームエクスパンダが導入

されている。

実験は、532nm 第2高調波 (SHG) 波長で行われた、焦点距離 100mm の対物レンズを使用。その結果、スポット半径 w_0 は $6.2 \mu\text{m}$ 、ビーム品質 M^2 は 1.1 以上だった (これらの値の両方ともスキャンングスリットビームプロファイラで計測した)。

新スキャナシステムの精度テストでは、研磨シリコンウエハをサンプル材料として使用した。アブレーションプロセスのスケールアップは、しきい値フルエンス $0.064 \text{J}/\text{cm}^2$ の研磨したステンレス鋼 1.4301 (U.S., AISI 304) で行い、結果は $0.47 \text{J}/\text{cm}^2$ 最適レーザピークフルエンスだった。アブレーション実験は、このピークフルエンスで行われた。

実験で使用したガルバノスキャナシステムは、独スキャンラボ社 (SCANLAB) の intelliSCANse である。クローズド

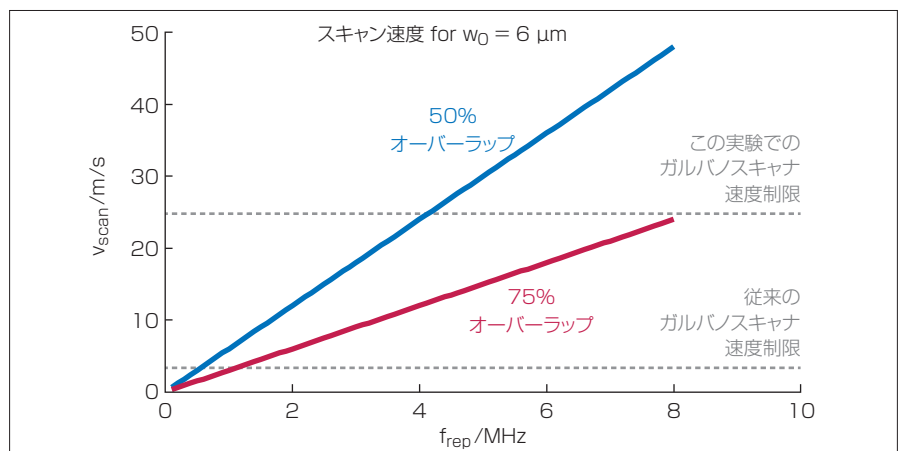


図1 ガルバノスキャナの手動正弦波、様々な状況で示される。

ループ・デジタル比例積分・微分(PID)制御アーキテクチャでは、2つのスキヤニング軸のための2つのガルバノモータのミラー位置は、同社特許のスキューエラー(SE)技術をベースにした光学デジタルエンコーダが提供する位置情報を使って制御される。デジタルエンコーダの利用により、位置角度スケールの直線性が改善される。これは、スキヤニングパスに沿ったレーザーパルスの分布均一性にとって不可欠である。

ガルバノメータスキヤナの軸端に取り付けたディスクスケールに頼る一般的な角度位置エンコーダと違い、スキューエラー(SE)エンコーダは光ビームを偏向させる小型ミラーを備えている。スキヤナの軸が回転している間、光ビームは静止スケールでスキヤンされている。このエンコーダ設計によって可能になる低慣性と高い信号品質から恩恵を受けてガルバノスキヤナは、たとえガルバノ技術で可能な通常の数速度範囲を超える高速スキヤンでも、動的性能と精度を維持する。

一般にクローズドループPID位置制御パラメータは、ガルバノスキヤナの予期される動力学に調整されなければならない。クローズドループPID位置制御の不安定な挙動を回避するには、スキヤン動作の動力学(帯域)と最大速度の間にトレードオフがある。

ここで報告された実験を可能にするために、最高速度を可能にする特殊な調整が開発されたので、不適切な位置軌跡の入力についての許容値を犠牲にするガルバノメータの速度制限がなくなった。制御アルゴリズムの軌跡は慎重に計画される必要があり、これによってシステムの動力学を超える加速を回避することができる。PID制御は有限帯域であるので、スキヤンシステム

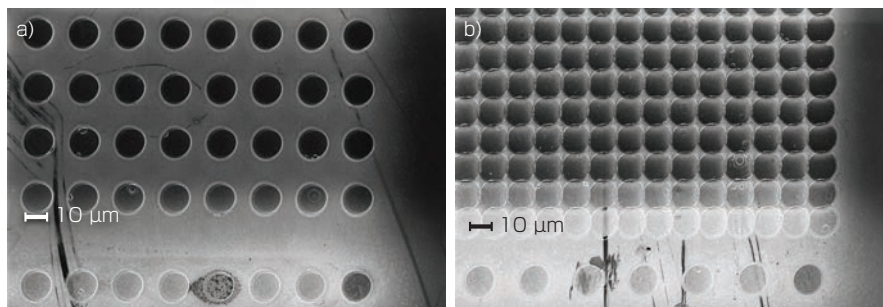


図2 穴のアレイ(a)をスキヤン速度6m/s、繰り返しレート f_{rep} 285kHzで生成し、パルス間隔は21 μ mとなっている。下限ラインはパルス間隔21 μ m、最大偏差<1 μ mによる参照パタン。もう一つの穴のアレイ(b)は、スキヤン速度25m/s、繰り返しレート f_{rep} 2MHzで生成し、パルス間隔12.5 μ m(参照ライン25 μ m)となっている。デジタルエンコーダ技術(上方)装備のintelliSCANse スキヤンシステムを使ってこれらのアレイを作製した。

はトラッキングエラーから逃れることはできない。このことがアプリケーションにおけるスキヤンシステムの全体的な精度の制約となるかもしれない。パフォーマンスは実験的に計測されなければならない。軌跡は、独Reflexxes社によるオンラインモーション生成ソフトウェアReflexxes Motion Librariesを使って設計された。

高速スキヤンシステムの精度を評価するために、穴の参照パターンがスキヤナを用いて静止状態で記されている。図2では、このパターンが写真の最下ラインとして見える。

スキヤン速度6m/sと繰り返しレート285kHzでパルス幅が21 μ mとなる(図2a)。参照ラインには、穴からの穴の位置偏差は見られない。図2bでは、スキヤン速度は25m/s、繰り返しレート2.1MHzに増加。その結果、パルス間隔は12.5 μ m、参照ラインにおける

穴から穴の位置偏差は最大5 μ mとなっている。

これらの結果から、スキヤン速度25m/sが高精度で達成可能であり、MHz領域のレーザー動作が可能であることが分かる。

繰り返しレートの増加

図3は、シャークスキンパターンの表面と3D構造を示している。これは繰り返しレート2MHz、スキヤン速度6m/sで生成されたものである。スループットの増加とは、平均パワーを増やしてより高いアブレーションレートを達成することを意味する。より高いパルスエネルギーの利用による単なる平均パワー増加は、表面品質の低下につながる、特にステンレス鋼の場合に言えることである。したがって、平均パワーの増加はレーザーパルス繰り返しレートと組み合わせると適切なレーザーピ

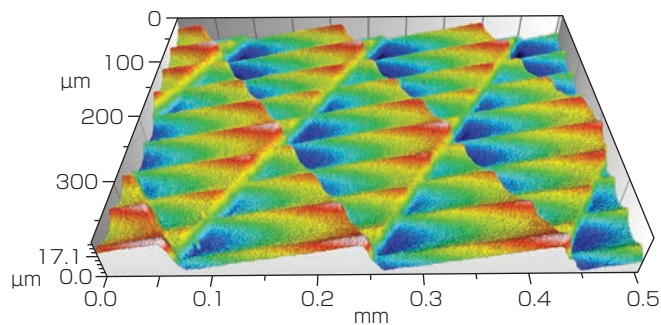
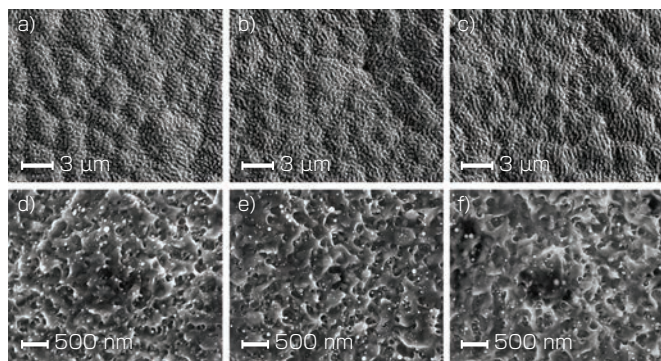


図3 シャークスキン構造(上方)は次のパラメータを使用して作製した。 $P_{av}0.57W$, $f_{rep}2MHz$, および $v_{scan}6m/s$ (532nm波長, $w_0=6.2\mu m$)。走査型電子顕微鏡(SEM)画像(下)は、片方向モードSE2 デテクタ 2 MHz (a-c)、4.1 MHz、8.2 MHz (d-f)で加工した構造の表面品質を示している。インレンズ・デテクタは、2MHz、4.1 MHzと8.2MHz。



ークフルエンスが維持されなければならない。

実験は、片方向および双方向スキャンモードを使用して行った。達成された特定除去レート(時間当たりの除去材料と平均パワー)に、利用したスキャンモードの影響はない。表面品質は、使用したレーザの最高繰り返しレート8.2MHzでも良好である。メルティング「ワーム」(worms)とドロップレットのわずかな増加が観察でき、2つのスキャンモードの違いはない。これらの結果から、すでに述べたセットアップとパラメータを用いたアブレーションプロセスは、悪影響なしにメガヘルツ領域までスケールできるという結論に行きつく。

新しいスキャン制御アルゴリズム

実験に適用した方法は、標準的なガルバノスキャナベースのシステムと比べて生産性が飛躍的に増加することを

示しているが、その優位性は、ある程度柔軟性を犠牲にすることになる。方形加工エリアだけがこれまでに実現されているが、異なる形状の加工には、十分な精度を達成するためにはパラメータの注意深い調整が必要になる。また、複雑なプログラミングは利便性を制限することになる。さらに、スキャナ速度を安定化するために必要とされる先行長がデューティサイクルを制限することになる、特に短いライン(小さな構造)では言えることである。

こうした欠点に対処するためにさらなる実験が計画されている。その場合、SCANahead制御プラットフォームをそなえたexcelliSCANスキャンヘッドが使われる。この技術は、スキャナ制御エレクトロニクスに直接実装された

ゼロトラッキングエラー制御アルゴリズムに依存している。

1msプレビュー時間ウインドウ内で、スキャナ制御によって受け取った位置コマンドが自動的に前処理され、トラッキングエラーを無効にして実行される。制御アルゴリズムが最適化され、どんなスキャン速度でもガルバノスキャン軸のフル加速性能にアクセスでき、スキャナ速度の安定のための設定時間が著しく高速になり、結果的にスループットが向上する。組み込まれた自動制御機能と修正された精密位置高速フィードバックにより、より複雑な加工のプログラミング、例えば非正方形やより小さな構造のプログラミングが可能になる。

532nm波長よりもむしろ赤外光を使用することでスポットサイズが拡大する、したがってアブレーションエリアも大きくなる。その結果、より高い平均パワーによる加工は、今日のUSPレーザのパワーを完全利用できるようになる。ガルバノスキャナを用いたマーキングは、所定のマーキング距離に適したスキャン速度を選択することで加工時間との関連で最適化できる。この最適スキャン速度とともに最大デューティサイクルが順守される、これは双方向スキャンで50%である。スキャナ速度の安定化に必要な先行長がデューティサイクルを制限するので、この問題に対処する新しい制御アルゴリズムを利用することでスループットが向上する。この制約を克服する他の戦略、例えばレーザパルスをマルチガルバノヘッドに分散することなども同様に頭に入れておく必要がある。

著者紹介

ホルガー・シュリュタは、独スキャンラボ社、ビート・イエギ、ビート・ノイエンシュヴァンダー、マルクス・ツィンマーマンは、スイスのベルン大応用科学に所属する。

e-mail: beat.jaeggi@bfh.ch URL: www.bfh.ch/en

LFWJ