

多機能ツール「ポリゴンスキャナー」の用途の考察と理解

マルセル・ウルフ、ジャンルカ・デニンノ、
ネッロ・リ・ピーラ、アンドレ・ストリーク

ポリゴンスキャン技術に基づくビーム誘導システムは、従来の技術と比べて高速かつ精密な、ビームの偏向の新たなレベルに到達し、穴あけ、切断、彫刻、面処理などの工程が、幅広い分野に応用可能となる。

レーザを使用する製造工程は、業界ではすでに定着している。しかし、このような製造方法は、工程の品質と効率を向上させるために継続的に開発する必要がある。レーザ加工の効率性は、最終部品の品質のみならず、加工に必要な時間にも左右される。

レーザ光源の開発により、加工システムで使用できる平均光出力が大幅に向上している。このような高い平均光出力を利用するためには、加工材料上のビーム誘導速度をさらに高速化する必要がある。一般的に使用されているレーザ誘導システムは、ガルバノミラ

ーをベースにしている。同システムでは、スキャン速度が毎秒15m程度であるため、高出力レーザ加工における加工速度に限界がある。この制限を克服するために、ポリゴンスキャナー技術に基づく新たなスキャンシステムを開発し、スキャン速度を毎秒1kmまで高速化した⁽¹⁾。同システムが業界の要件を満たすためには、継続的な開発が必要である。

技術的な実現

一般的に、レーザ誘導システムは、光学機械または電気部品サブシステム

に分類される。スキャナーの光学部品には、ポリゴンホイール、ガルバノミラー、fシータ ($f-\theta$) 光学系が挙げられる。図1(a)には、ポリゴンミラースキャンシステムの完全なモデルが示されており、図1(b)には、光学スキームの概略図が示されている⁽²⁾。

光学部品により生成されるスキャンフィールドは、高速軸と低速軸で構成される。ポリゴンミラーの回転速度 (rpm) が高ければ、高速軸と呼ばれるウルトラファーストビーム偏向が可能である。8つの反射面が交差する地点で、レーザ信号は内部の電子制御によ

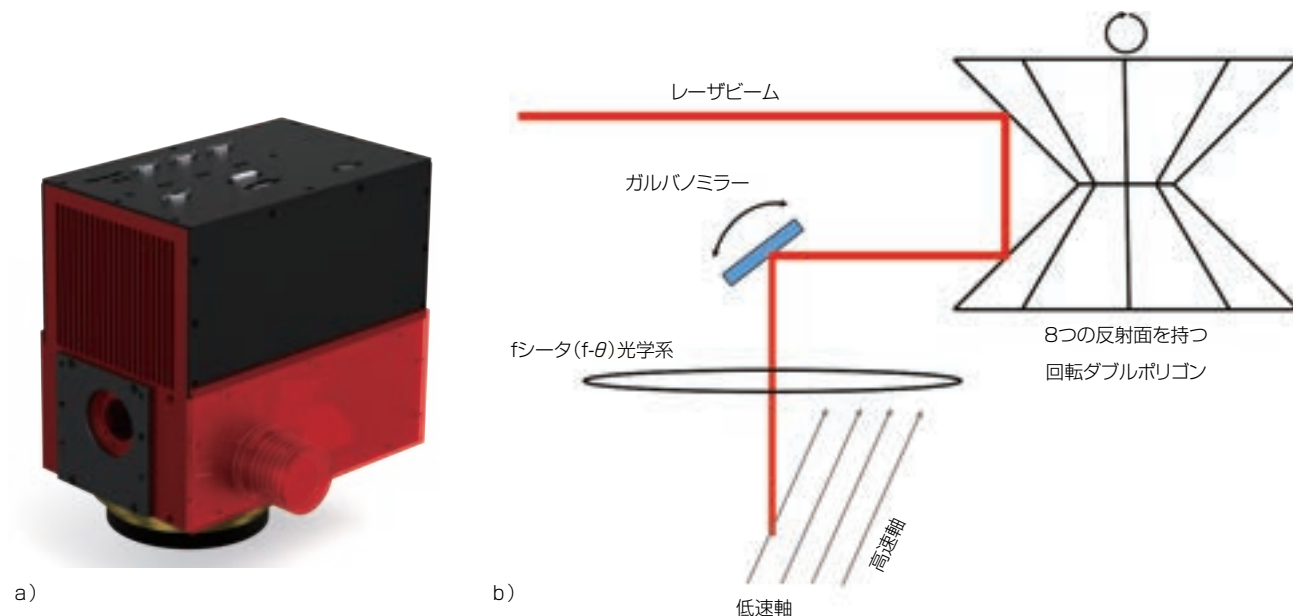


図1 ポリゴンミラースキャンシステム(a)と光学スキームの概略図(b)

って自動的にオフになる。次の反射面が配置されるのを待つ間、ガルバノメーターミラーはさらに1ライン分の距離を移動する。その結果、低速軸と呼ばれる動きが発生する。この高速軸と低速軸の2つの動きが合わさると、2次元の加工領域が生成される。加工品質を向上させるために、特殊なウェッジ形状のダブルポリゴンミラーが使用される。このポリゴンの特性を活用すれば、fシータ光学系によって引き起こされる歪みが軽減される（参考文献1に詳述の通り）。

もう1つの便利な機能として、ポリゴンの反射面のミラーペアを使用すると、ビームの不整合を補正できる点が挙げられる。それぞれの反射面に独自の補正值を設定することにより、シングルラインの整列を最適化できる。また、特別に設計されたダブルポリゴンを活用すれば、fシータ光学系によって生成される歪みが軽減される。電子システムの中心部には、FPGA（フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ）を搭載している。FPGAをウルトラファーストエレクトロニクスと組み合わせると、スキャナーはほぼリアルタイムで外部イベントに反応して動作する。FPGAの設定はイーサネット接続を介して実行される。さらに、実装された汎用I/Oインターフェースを使用すると、ポリゴンスキャンシステムを全自動の機械に組み込むことも可能だ。加工タスクを設定すると、ポリゴンスキャナーは汎用I/Oインターフェースを介して、PLC（プログラマブルロジックコントローラ）ソフトウェアによって制御される。レーザーはレーザーI/Oインターフェースを介して、アナログまたはデジタル信号によって制御される。スキャナーは外部軸システムと同期させることも可能だ。

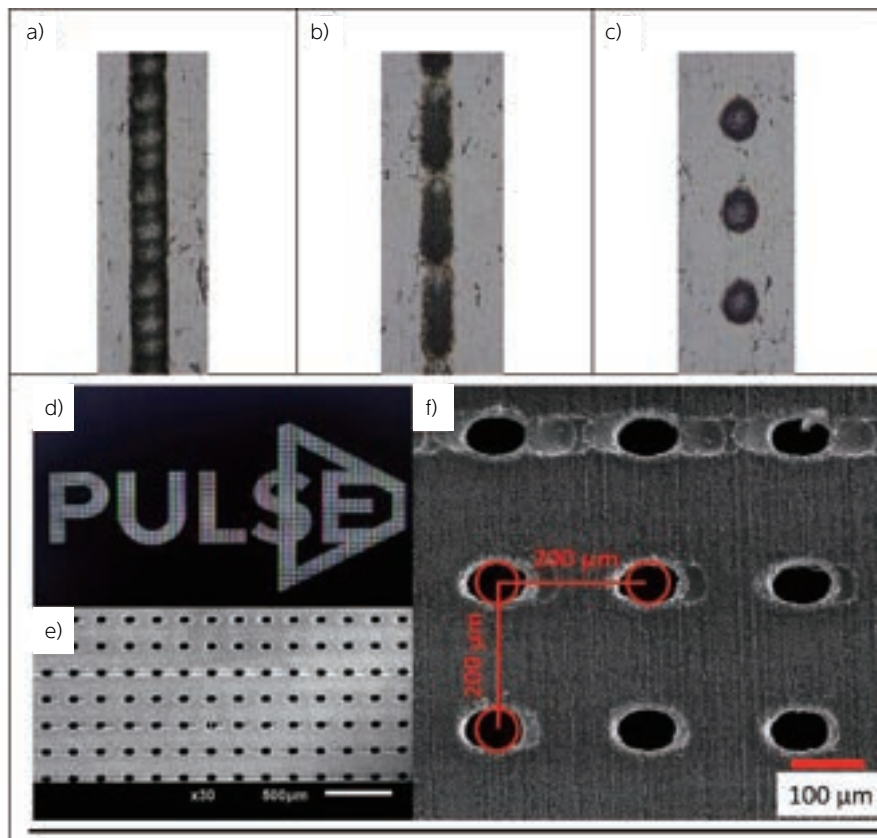


図2 線状加工の出現は、POD（パルスオンデマンド）機能の有無と交差回数によって決まる。POD機能がない状態で10回交差したパターン(a)、POD機能がない状態で3回交差したパターン(b)、POD機能がある状態で10回スキャンしたパターン(c)、レーザードリル加工されたシリコン基板(d)、走査型電子顕微鏡の画像(e)、レーザードリル加工された穴の拡大図(f)である。異なるモードを組み合わせることもできる。例えば、(d～f)では、PODモードと後述する2次元bmpモードを組み合わせ、2次元画像をドリル加工している

軸システムの位置変更中にも、スキャナーはほぼリアルタイムに反応して動作できる。ラインスキャン速度 v は、ポリゴンスキャナーモーター U の回転速度と、使用するfシータ光学系の焦点距離 f に左右される。加工処理に要求される精度およびスキャンフィールドの面積によって、必要な光学系が確定し、達成可能なラインスキャン速度が制限される。

バヨネット式光学ホルダーを活用すると、複数のfシータ光学系を使用できる。複数使用することにより、光学系を迅速に交換でき、スキャンシステムの柔軟性が大幅に向上する。2000mmのfシータ光学系を使用した

場合、最大ラインスキャン速度は理論値で毎秒4.775kmに到達する。この組み合わせでは、最大毎秒3kmのラインスキャン速度が達成された。これまで、同スキャナーは10kWの連続波ファイバレーザを使用して試験が行われ、長時間の負荷試験にも損傷なく合格した。今後、さらに最大電力処理能力の試験を行うことで、システムの限界が明らかになるだろう。

多機能ポリゴンスキャナー

レーザーシステムの平均出力レベルの向上に伴い、一般的に市販されているビーム誘導システムよりも、高速な製品が要求されるようになる。ポリゴン

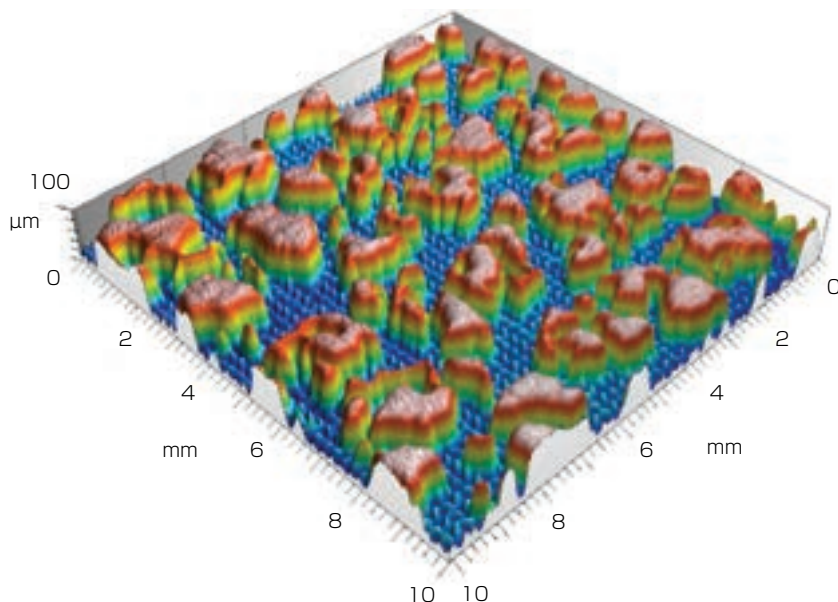


図3 提供された構造体データの地形情報。この構造データの3次元情報は、2次元の8ビットビットマップに変換・転送され、そのデータには256階調のグレースケール値が含まれる。内部のスカナーエレクトロニクスでは、各グレースケール値を個別に機械加工できるようになった

スカナーは、一般的に市販されているガルバノスカナーに比べ、約100倍の偏向速度を実現できる。そのため、加工処理時間とコストを同様に削減できる。ポリゴンスキャンシステムは、穴あけ、構造化、彫刻、2.5次元加工、レーザ誘起前方転写 (LIFT)、切断加工など、多種多様な加工処理に使用できる。ポリゴンスキャンと近赤外線レーザの組み合わせのみならず、紫外線レーザのシステムも使用可能であり、試験が行われている⁽³⁾。

穴あけ加工には、レーザパルスの正確な配置が必要とされる。この用途では、ポリゴンスキャンにはPOD (パルスオンデマンド) モードが実装されている。ポリゴンスキャンエレクトロニクスは、ポリゴンホイールの位置と、レーザのI/O出力信号を同期させる。表面上のレーザパルスの正確な位置が認識されると、I/O インタフェースからレーザパルスピッカーに信号が送信される。すると、パルス列の中から1つのパルスが正確に選択され、ワーク

ピース上に正確に配置される。この技術とポリゴンスキャンの正確性によって、単一パルスによる薄い箔の穴あけ加工のみならず、数千回のパルスが必要とする金属板の穴あけ加工も可能になる。

ポリゴンスキャンは、シリコンウエハの高スループットの穴あけ加工に使用されていた⁽⁴⁾。加工箔を貫通するために複数回のパルスが必要な場合、点列を複数回加工する必要がある。高速スキャンでは、「ジッター」と呼ばれるレーザパルス選択信号とレーザパルス自体の間に生じる、時間的なゆらぎが、重要な要素となる。静的または固定のレーザ周波数では、レーザパルスはスキャンシステムと同期されない。そのため、パルスは1/fの時間幅で材料に印加される。数回交差すると、穴が不鮮明になる (図2b)。処理される交差回数が多いと、線状の加工が生じる。この状態を回避するために、レーザシステムとポリゴンの位置情報を同期できるよう、スキャンシステムがレ

ーザシステムに対してPOD信号を送信する。この動作モードではジッターが低減され、高速スキャンで穴あけモードが有効になる (図2c)。このモードでは、遮蔽効果や加熱を最小限に抑制できる。

熱分布モード

金属箔のように基板が非常に薄い場合、レーザ加工の発熱が問題になる可能性がある。薄膜材料が局所的に加熱されるため、箔が破れる可能性がある。熱分布モードを使用すると、材料に特別なエネルギー分布を実装できるため、局所的な加熱を回避できる。加工中にスキャンラインを一時的に削減し、後ほどその削減したラインを再スキャンして補完すれば、局所的な温度を下げるのが可能になる。この処理を行うと、加工処理時間は長くなるが、特に薄膜材料の高速加工処理に、新たな可能性が開かれる。主な応用分野としては、薄い箔のミシン目加工や切断などが考えられる。

また、ポリゴンスキャンは、レーザ切断にも使用できる。箔のように非常に薄い素材の場合、一般的なレーザ切断システム (メルトカット加工) でレーザを切断することは不可能である。スキャンシステムを使用してアブレーションカット加工を実現すると、加工速度を向上させることが可能だ。さらに、超短パルスレーザシステムを使用すれば、切断品質も優れている。ポリゴンスキャンを使用することにより、ラインカット加工を高速化できる。箔の切断処理は、スカナーの性能を最大限に発揮できる重要な応用分野である。

ポリゴンスキャンは、面処理に最適である。ポリゴンミラースキャンを使用すると、疎水性表面や親水性表面など、いわゆる機能性のある表面を

効果的に生成できる。広範な面を短時間で処理することができ、毎分0.77平方メートルの処理面積を実証した。同スキャナーを使用すると、面処理が非常に効果的になる⁽⁵⁾。疎水性表面は細菌の繁殖を抑制するために必要であり、親水性表面は医療分野において摺動面を製造するために必要である。また、ポリゴンスキャナーを使用すると、機能性のある表面加工のみならず、さらに深い彫刻加工も実現できる。スキャナーのビットマップワークモードを使用すると、2次元の面処理や2.5次元の構造化彫刻加工処理が可能だ。構造情報は、8ビットまたは16ビットのビットマップから提供される⁽⁶⁾。ビットマップの各層から、ワークピースに情報が伝達される。PULSEプロジェクトでは、開発したスキャン技術を活用して、自動車産業向けの構造化加工を実現した。設計データセットは、伊フィアット社研究センター(Centro Ricerche Fiat SCPA)から提供された(図3)。

最終的な構造は、層ごとに形成されている(図4)。1層あたりの再スキャン回数を調整することにより、最終的な構造の絶対深度を制御できた。レーザーパルスの反復周波数が高い場合、低いジッターが生じ、PODモードを使用しなくても、鋭い幾何学的形状を形成できる。

軸同期モード

ポリゴンスキャンシステムのもう1つの斬新な機能は、統合された軸のシフトレジスタである。各次元には、個別のエンコーダー I/O が実装されている。これらは、外部軸システムをスキャナーエレクトロニクスと同期させるために使用される。外部軸が接続され、スキャナーと同期している場合、シス

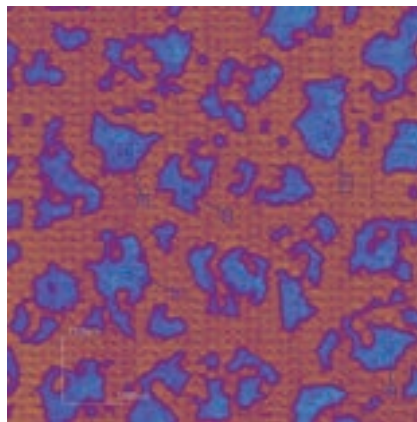


図4 5つの測定ポイント(平均値105 μ m)を持つスチール基板上の構造

テムはほぼリアルタイムで相対的な動作に対応できる。従って、動作しているのがワークピースであるのか、スキャナー自体であるのかは重要ではない。どちらのプロセス状況も、制御ソフトウェアのプログラミングが可能だ。統合されたシフトレジスタは、スキャンフィールド読み込まれたデータの一方、または両方を、位置に対して相対的に移動できる。これにより、非常に詳細な構造を持つ広範な面処理が可能になる。

謝辞

本記事に寄稿したメンバーが所属するPULSEプロジェクトは、Photonics Public Private Partnership (フォトニクス官民提携事業: www.photonics21.org) のイニシアチブである。同プロジェクトは、欧州連合の研究・イノベーションプログラム「Horizon 2020」の助成金契約番号824996に基づいて資金助成を受けている。

参考文献

- (1) A. Streek and S. Klötzer, *Sci. Rep.*, 4, 82-85 (2015).
- (2) M. Wolf, M. Müller, and A. Streek, *Sci. Rep.*, 11, 201-204 (2019).
- (3) F. Rößler, M. Wolf, and A. Streek, *Proc. LPM2022*, 22-014, Presentation ID115 (2022).
- (4) F. Rößler, M. Müller, and A. Streek, *J. Laser Micro Nanoeng.*, 15, 3, 220-227 (2020).
- (5) J. Schille, L. Schneider, F. Ullmann, S. Mauersberger, and U. Loeschner, *Proc. MATADOR Conf. Adv. Manuf.* (2017).
- (6) F. Rößler, M. Müller, R. Ebert, and A. Streek, "High-power nanosecond pulsed laser engraving with an ultra-high speed polygon mirror scanner," *Hochschule Mittweida* (2021).

著者紹介

マルセル・ウルフ (Marcel Wolf) は、独ミットヴァイダレーザー研究所の研究開発部門に所属。ジャンルカ・デニンノ (Gianluca Deninno) は、伊トリノ大の博士課程の学生。ネッロ・リ・ピラ (Nello Li Pira) は、フィアット社研究センターのグローバル研究開発部門マテリアルマネージャー。アンドレ・ストリーク (André Streek) は、ミットヴァイダレーザー研究所のレーザー技術の教授。
e-mail: wolf9@hs-mittweida.de URL: www.laser.hs-mittweida.de

結論

最新のポリゴンスキャンシステムを導入すれば、幅広い応用分野が期待できる。高速な偏向速度を活用することで、箔のような温度に敏感な素材でも高いスループットで穴あけをはじめ、ミシン目加工、切断が可能になる。さらに、疎水性表面や親水性表面などの機能性のある表面を生成するテクスチャリング、さまざまな用途の金型を製作するための彫刻、太陽電池業界における貫通接触用の穴あけということも可能になる。ポリゴンスキャナーと高出力レーザーを組み合わせて使用すると、多様な加工処理をはるかに高速に実行できる。

レーザーの平均出力レベルは、今後飛躍的に向上することが予想される。ポリゴンスキャンシステムには、このような高出力に対応できる機能が備わっており、さらに高速なレーザー加工が可能になる。同システムはさまざまなモードで実装可能なため、最先端のレーザー加工・製造設備のアップグレードに最適である。