

三次元計測用レーザーパターン光源

=用途に応じたレーザーパターンの使用方法=

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

5Gの普及に伴いスマートファクトリーも実現性が高くなってきた。工作機械それぞれに三次元センサが付いて加工品の三次元データをリアルタイムで収集することにより品質、工程管理に大幅な改善が期待されている。このためには色々なワークに対して短時間に高精度に計測できる三次元センサが求められている。

パターンを投射して三次元計測をする試みは1970年代から行われており、古くはキセノンやハロゲンのランプ光源から幻灯機の原理で機械的に作成されたスリットを対象物に投射するやり方だったが、大型、大電力で微細なパターン照射が難しかった。近年ではDMDやLCOSによってプロジェクターとしてパターンが作成される様になり、青の高出力レーザーによって従来よりも明るく短い起動時間や長寿命になったが、光源としてのレーザーは蛍光体で一旦白色に変換されるため、発光点サイズは大きく明るい投射レンズで照射されるため、被写界深度は大きく取れない。

これに対してレーザービームを用いたものはフォーカスフリーと言われる、距離によってビーム径が大きく変わらないのでピントが合う深度を広く取ることができる。これにより三次元計測では高さ方法の計測範囲が拡大できるが、実現するためにはいくつかの条件が必要となる。

本稿では、ワンショットアクティブステレオのパターン光源とグレーコードや位相シフトで使用されるスキャン型のパターン光源について紹介する。

2. DOE (回折光学素子)

DOEは、レーザーの回折を利用したホログラフィック光学素子で、コンピュータによって計算された形状を作成することで色々なパターンを作ることができる。機能としては光学レンズ機能、分岐機能、強度分布変換機能、波長フィルター機能があるがパターン光源には分岐機能と強度分布変換機能が用いられる。

(1) 分岐機能

分岐機能は、入力レーザービームを所定の角度や強度パターンに変換する機能である。マイクロソフト社のKinect v1は近赤外のランダムパターンを用いており、水平57度、垂直43度の範囲でモーションデテクターなどに使用されている。DOEを2段設けて1段目で入射ビームを9分岐し2段目でランダムパターン化することにより広照射エリアと0次光の低減を行っている。

(2) 強度分布変換機能

強度分布変換機能は、入射ビームの強度分布を変換するもので、ディフューザーのようにも使用され細かいことはできないが0次光の無いパターンを作ることができる。この設計では入射ビームは平行光でも設計できるがコリメーターレンズの無い半導体レーザーの発散光でも設計できる。

最近では新しい設計手法で三次元のパターンに変換することもでき、0次光の無い、かつウェスト範囲を伸ばすような三次元設計もできるようになってきた⁽¹⁾。

分岐タイプでは入射ビームは一般的にレーザーの平行光で設計されるものが多く、分岐後のビームの伝搬の様子は入射ビームの1本と同様になる。レーザービームは伝搬法則からある程度のビーム径になると広が

らないでフォーカスフリーが実現できる (図1)。ただ細いビームでは広がるので使用距離範囲で必要なビーム径を算出する必要がある。

実際には特定の距離で小さいスポットになるフォーカスビームとなるが (図2)、この場合にはビームウエストがDOEを中心に円弧状になり像面湾曲が発生する。また、分岐ビームは一つのレーザー光源から出ているので、波面が揃っているのにビームが重なると干渉によってドットの輝度分布に影響する。

計測分解能は、ドット間隔またはライン間隔とカメラの解像度と関連するが、分解能を上げようとするときドットサイズを小さくしなくてはならないのでビームウエスト範囲が狭くなる。ラインパターンでは設計上の注意が必要で、入射ビーム径、波長から使用する距離でのパターンでの隣接するビームとの間隔 (放射角) を設定する必要がある。したがって標準DOEとして販売されているものもレーザー光源の出射ビーム径とビームウエストのビーム径によっては性能が出ない場合がある。

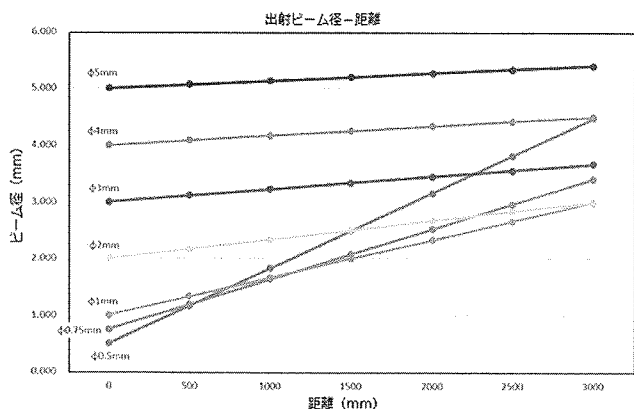


図1 ビーム径

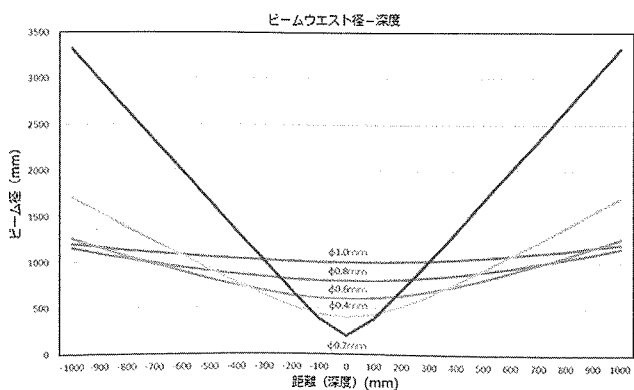


図2 ビームウエスト径

3. DOEの特性

DOEの特性として回折効率、分岐角、0次光、ノイズ、多次ゴーストがある。

回折効率について設計、製造法としてシングルレベルとマルチレベルがあるがマルチレベルのレベル数が大きくなれば回折効率が向上する。理論上ではシングルレベルでは40%であるがマルチレベルの8段階では95%となる⁽²⁾。

分岐角は製造上の最少加工ピクセルに依存する。構造ピッチが小さいほど分岐角が大きく取れる。設計に際してはどのようなプロセスで製造するかを設定する必要がある。シングルレベルはバイナリーとも呼ばれるが、一般的にはパターンが点対称のミラーイメージとなるためパターンに制限が出る。現状での構造ピッチは0.5~3 μmくらいで、構造高さは0.9~1.8 μm程度である。

0次光は入射ビーム方向に発生するスポットで通常0.5%くらい発生するが、これは設計波長からの波長偏差によっても変化する。半導体レーザーではロットによって波長偏差が±10 nmあり、また、APC制御をかけていても周囲温度によっても波長が変化する。この温度によつての変化は40 degで2~3 nmあり、波長変化は分岐角にも影響するので精密測定用のパターン光源ではバルチェ素子などによる半導体レーザーの温調が必要になってくる。0次光は設計波長で最適化されるので他の波長で使用すると0次光が増加する。また、分岐角は波長に依存するので波長が長くなると分岐角が大きくなり、パターンは大きくなる。レーザ

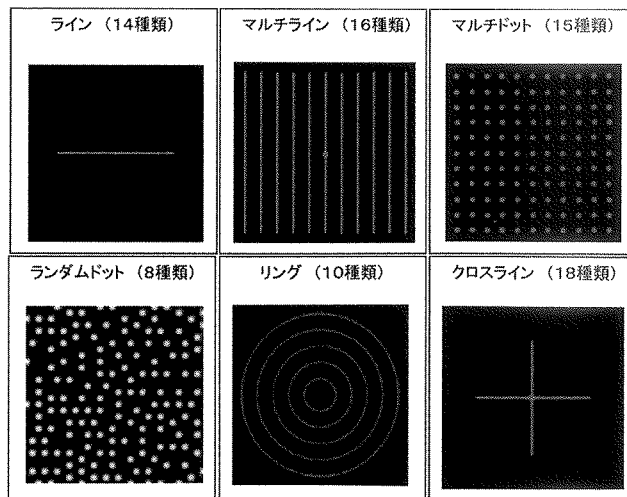


図3 DOE種類

一安全クラスで問題となるのが0次光で、仮に0.5%として許容最大パワーを1 mWとすると入射パワーの最大は200 mWと計算される。

ノイズは分岐ビームの間に出る拡散光で製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。分岐数が多い場合や分岐角度が大きい場合に発生しやすい。

多次ゴーストは通常のパターンの周りに薄くパターンが出る現象でこれも製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。可視光帯では肉眼では見えるが実際にはパワーとしてはかなり低い。

DOEによって製作できるパターン例を図3に示す。

4. DOEパターンによる三次元計測

DOE応用として現在もっとも用いられているのは、三次元計測である。

標準品のマルチドットやマルチラインは簡単に使用できるが、画像処理として特異点が見つげにくい。ランダムパターンは多く使用されているが解像度を上げようとすると分岐点数が増えて、1ドット当たりのパワーが低下してコントラストが悪くなる場合がある。

一般的に使用できるのは発光点サイズの小さなシングルモードレーザーでパワーが大きいものについてはマルチモードで発光点サイズが大きく、ドットサイズが大きくなることがあるので注意が必要である。

特殊なDOEパターンを用いることでワンショットでの三次元計測ができることが報告されている⁽³⁾。高速カメラを用いると連続的な三次元データが得られる。これに用いるパターンは図4のように波型格子で特異点を見つけやすいパターンとなっており、分岐角も対角70度で分岐数約12万により実現されている。また、

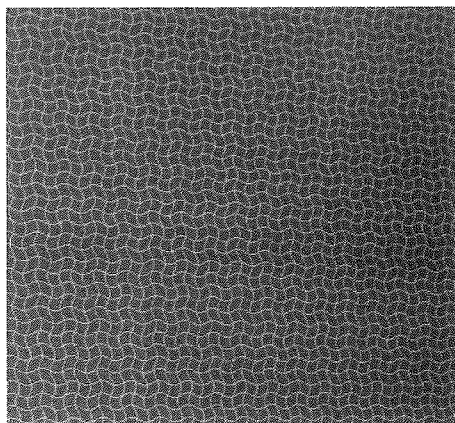


図4 波型格

小型で光源を製作できることから内視鏡カメラと組み合わせて体内の三次元計測を行う試みも行われている⁽⁴⁾。これに使用されているDOEの光源ユニットはファイバー光源であるが先端の形状はφ2.6 mmで長さ12 mmの超小型で内視鏡の鉗子用パイプ内を通すことができる。

5. 二次元プロジェクター

光MEMSスキャナーを使用した小型プロジェクターがピコプロジェクターとして販売されている。これは二次元の超小型スキャナーによって主走査側は共振で副走査側は非共振で解像度720P、20FPSで30ルーメン程度が販売されている。

このプロジェクターは、レーザービームの広がり角と画像の広がり角を近く設定することでフォーカスフリーとなっている(WVGAの例 図5)。WVGAの横方向の解像度は848ピクセルあるので500 mmの距離で1 mmピッチのグレーコードが可能になる。

光MEMSスキャナーのメーカーから三次元センサとして照射角度44×66度、分解能0.2 mm、計測距離0.05~1.5 m、レーザー940 nmで提供されている⁽⁵⁾。光MEMSスキャナーのミラーサイズが約1 mmのため出射ビームの制御に制限あるのと、大きなパワーが入られないので測定ワークに制限が生じる。

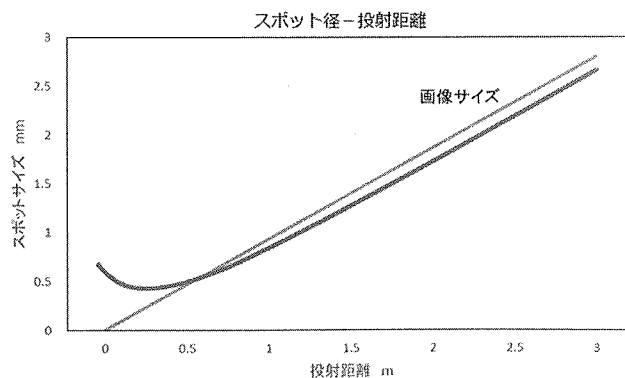


図5 ピコプロ

6. スキャンプロジェクター

前述ディスプレイ用光MEMSスキャナーは主走査周波数が22 kHz位になるので大きいミラーサイズが取れないが、低い周波数では共振周波数を下げることが

できるので共振型、非共振型のいずれでも $\phi 5$ mmくらいのミラーサイズが製作できる。

さらに大きいミラーサイズが必要な場合にはガルバノスキャナーやレゾナントスキャナーで数10 mmのミラーアパーチャーを設定することもできる。これによりある程度の距離があっても細いラインを作れることから、所定の距離で解像度を上げることができ、大きなパワーのレーザーも走査できる。

構成としてはレーザー光源にラインジェネレーターの光学系を通し機械スキャナーで偏向する。駆動する角度信号とレーザーの点灯信号を同期してデジタルでレーザーをスイッチングすればグレーコードで使用する縞パターンが生成できる。アナログの正弦波でレーザー強度を変調すれば位相シフト用の正弦波の強度変調パターンが生成できる。

通常スキャン状態でスキャナーからの同期信号でカメラのシャッターを切り、1スキャン1画面で取り込んで画像処理する。

スキャンプロジェクターには通常の光切断の延長で、低速または非共振形で角度の異なる複数画像から三次元計測することで廃炉でのデブリ形状計測に使用できることが報告されている⁽⁶⁾。このセンサの特徴としては一本のライン光源を動かして計測するので蒸気などで散乱光がある状態でも計測できることである。

7. スキャンプロジェクターのレーザー

スキャンプロジェクターのライン幅の深度方向の変化は前述のレーザービーム径の変化と同様で分解能を上げようとしてライン幅を狭くとると深度が取れなくなる。

また、レーザーのスイッチング速度も分解能を上げると高くなり、グレーコードのデジタルスイッチングでは100 MHz近くまで変調可能であるが、位相シフトのアナログ変調では変調ドライバの周波数特性と通常DAコンバーターによって変換される周波数に注意が必要である。レーザーの波長はカメラの波長感度によるが不可視の赤外では人間の目に見えないので監視などに使用されることもある。

計測速度を上げようとするともフレーム時間が短くなるので大きいパワーのレーザーが必要になってくる。近年車載などで高出力の青色(波長445 nm)が出ており、マルチモードであるが3 Wくらいまで商品化されている。ただこれらは動作電流が3 Aくらいあるのでこれを高い周波数で駆動するには、レーザーのリー

ドインダクタンスを少なくするためレーザーとレーザードライバ回路の物理的な距離を近くしなければならない。さらに発熱も大きいので放熱設計も必要でレーザー光学系とレーザードライバ回路、レーザーの放熱と配置での設計難易度が高くなる。高出力のレーザーでは前述のように発光点のストライプサイズが大きくなりライン幅が広がるので発光点サイズを考慮した光学シミュレーションが必要である。

また、レーザーの安全クラスによっては遮光が必要となり作業性が悪くなる場合がある。

スキャンプロジェクターのレーザーの安全クラスは日本工業規格 JIS-6802:2014、追補1:2018が発行されているが安全なクラスはクラス1Mで可視光ではクラス2M、条件によってはクラス3Rが適用できる。

走査レーザーではスキャナーが故障した場合にも安全クラスを確保する必要があるのでシステム上の考慮が必要である。

8. スキャンプロジェクターのスキャナー

スキャン速度はガルバノスキャナーや非共振の光MEMSスキャナーにおいては駆動信号に三角波やノコギリ波を用いてリニア部分で使用するのであれば等速性が保たれるが、高速にスキャンする時に正弦波を用いる場合にはその速度はコサインとなるので走査の広い範囲で使用して等間隔でレーザーを点灯すると実際に投射されるラインは等間隔にならない。これを補正するためにレーザーの点灯クロックを走査の周辺は高く、中央で速度に応じて低くしようとするとそのためのクロックの源発信周波数はかなり高くなる場合が多いので検討が必要である。

スキャンプロジェクターのスキャナーはガルバノスキャナーが多く用いられる。各社ミラーサイズによってスキャナーをシリーズ化しているが、ミラーサイズが大きくなればトルクが必要となりローター側のイナーシャも大きくなるので駆動周波数が低下する。

スキャンするミラーは使用波長によってコーティングを選択する必要があり、金コートでは緑よりも短い波長帯は反射率が下がるので可視光から近赤外では銀やアルミコートが使用されている。高速で走査する場合にはレゾナントスキャナーが使用できる。ミラーサイズ $\phi 7$ mmで光学10度を12 kHzでスキャンするものもある。レゾナントスキャナーは共振を利用しているので共振周波数の個体差があり制御系と同期する場合には制御系で調整する必要がある。

スキャン速度、ミラーサイズが自由に選択できるのがポリゴンスキャナーである。ポリゴンミラーの面数、面間寸法、面厚はカスタマイズできるし、モーターの回転数も設定することができる。ただ回転方向が一方向で定回転に達するまでに時間がかかり、面倒れや面分割といった機械加工上の誤差を考慮しなくてはいけないのと、2,000rpm以下の低い回転数では回転ジッタが悪くなるので選択には注意が必要である。

近年では光MEMSスキャナーが開発されてスキャナーが小型で省電力になりセンサユニットには有利である。共振形と非共振形が販売されており共振形はミラーサイズφ3 mmで500 Hz、光学振角50度が入手できる。この共振周波数もレゾナントスキャナーと同様に個体差がある。

非共振形はφ2.6 mm、非共振最大100 Hz、光学振角30度が入手できる。非共振光MEMSスキャナーでも共振点は存在し一般的に共振周波数の5分の1以下で使用することが推奨されている。

ここで注意しなくてはならないのが駆動波形である。正弦波は単一周波数で問題ないが走査がリニアでないので使いにくい。そこで三角波やノコギリ波が使用されるが波形の折り返し点は高い周波数が含まれるのでリングングなどが発生する場合がある。折り返しの波形も最大周波数以上を含まない滑らかな波形で繋ぐ必要がある。

9. レーザースキャンプロジェクターの製作

図6は当社で製作した例である。センサヘッド形状は60×35×35 mmと光MEMSスキャナーの採用により小型になっている。32度×38度の放射角で波長520

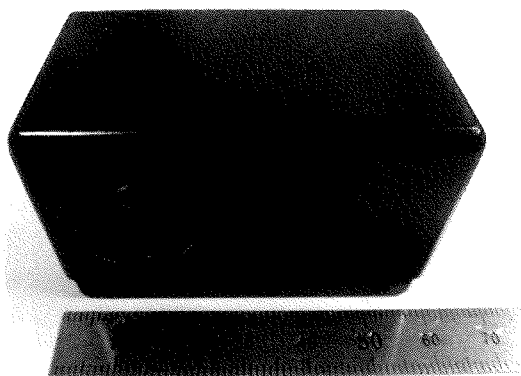


図6 LSP

nmの緑のラインをレーザーのスイッチングにより100 kHz以上で変調してラインを形成することができる。

作動距離400 mmで200 mmのエリアを三次元計測することが可能である。

10. おわりに

現在レーザーを使用した三次元計測は少ない枚数の画像から高速に検出するアクティブステレオ法と、複数枚のグレーコードと位相シフトを組み合わせた高精度に計測できるシステムと、TOFカメラによるシステムが増えてきているように見える。

色々なデバイスの開発によってこの先それぞれ進化していくと思われるが、それぞれのメリット、デメリットによって使い分けされていくように感じられる。

〈参考文献〉

- (1) スペースフォトン ウェブサイト
<http://www.spacephoton.jp/>
- (2) (社)応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ：回折光学素子入門 増補改訂版、オプトロニクス社 (2006)
- (3) (国研)産業技術総合研究所 佐川氏
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120802/pr20120802.html
- (4) (大)九州大学 川崎氏
http://www.cvg.ait.kyushu-u.ac.jp/ja/research/endoscopesystem_jp.html
- (5) OPUS MICROSYSTEM ウェブサイト、3D Depth Camera
http://www.opusmicro.com/3d_cam_en.html
- (6) 亀尾・他 (三菱重工(株))：三次元形状計測装置の開発、日本ロボット学会誌、Vol.35、No.9 (2017)

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー(株) 代表取締役