

レーザースキャンプロジェクター

エーエルティール(株) 高野 裕・藤田 修平

1. はじめに

パターンを投影して3次元計測する方法は古くから用いられており、近年ではDMDやLCOSを用いたプロジェクターで高速にパターンを変えることもできるようになった。グレイコードパターン投影法では粗いパターンから密なパターンまで複数のパターンを順次投影する必要があるが、通常のプロジェクターではフレームレートは早く数秒で数10枚のパターンを照射することができ、カメラへ同期信号を送ることで同期して画像を取り込むことができる。

また、位相シフト法では濃淡パターンの位相を変化させながら撮像することで計測分解能を上げることもできる。ただDMDやLCOSによるプロジェクターは通常のプロジェクターと同じくフォーカス位置を検出深度の中央に設定する必要があり深い深度のワークではピントが甘くなりパターンのコントラストが悪くなる場所が出てくる。

また、ワークがゴムのような反射率の低いものでは反射光が少ないのでその分照射パワーを上げる必要が出てくるが、これはプロジェクターの大型、大電力につながり好ましくない。

光切断法は古くからおこなわれて通常はライン光源とカメラが固定でワークがコンベアなどの上を移動することにより3次元形状を測定することができる。これと同原理でワークが固定されてライン光源を動かすことでも3次元データが取得でき、これをライン走査方式と呼びこのスキャナーにはガルバノスキャナーが用いられてきた。

ただ、ガルバノスキャナーは大型で電力も大きくセンサに組み込むには大変であったが近年になり光

MEMSスキャナーが実用化され、この中でも非共振タイプと呼ばれるものはDC駆動ができてガルバノスキャナーと同じような使用ができるようになった。

このスキャナーはMEMSプロセスで作られているので小型、軽量、省電力でセンサに組み込むには適している。レーザースキャンプロジェクターは、中出力の半導体レーザーと均一なラインを作ることができるラインジェネレーター光学系と光MEMSスキャナーを組み合わせたユニットで、レーザーをCW点灯してライン走査方式での使用の他、レーザーをデジタル変調してグレイコードパターン投影法やレーザーをアナログ変調することにより位相シフト法のプロジェクターとして使用することもできる。

2. スキャンプロジェクターの構成要素

2-1 光MEMSスキャナー

光MEMSスキャナーは現在2次元のディスプレイタイプがスマートグラスやヘッドマウントディスプレイに組み込まれている。

現在駆動方式としては主に三つの方式が提案されていてそれぞれメリット、デメリットがある。

古くから作られているのが電磁タイプで、ミラーがマグネット側のムービングマグネットのタイプやミラーがコイル側のムービングコイルのタイプがある。この方式では磁気回路が必要で小型化の障害になる場合があるので起磁力でコイルにある程度の電流を流す必要がある。

次に商品化されているのが静電方式で、ミラーの裏面に形成された櫛歯状の電極で静電力を発生させて駆

動かせる。この方式では小型化はできるが、高い駆動電圧が必要で100~200 Vなどでプッシュ、プル駆動が必要な場合もある。

次はピエゾ方式でピエゾ素子の伸び縮みを利用して駆動する。この方式はピエゾ材料を所定厚さに積層して分極するなど製造工程が複雑である。

共振型でミラーを振るのであれば加振力は少なく済むが、DC駆動（所定の角度でミラーを止める）にそれなりの力が必要でそのために蛇腹状にアクチュエーターを形成するなど工夫されている。

ディスプレイ用ではミラーサイズは $\phi 1$ mmくらいだがスキャンプロジェクターではもう少し大きなミラーが必要になる。これはライン光源にするラインジェネレーター光学系の後にスキャン系が配置されるためである。

ミラーサイズが大きくなることは共振周波数が下がることで通常数mmのミラーでは共振周波数は600~1,000 Hzに下がってしまう。

非共振タイプ1次元の光MEMSスキャナーとして台湾のULTIMEMS INC. のUM-6004Bでは表1のスペ

表1 仕様

Type	UM-6004B-04
Shape	Rectangular Mirror
Mirror diameter	5.5mm(along rotation axis)x3.6mm
Slow scan	DC driving or 600Hz(resonance)
Typical Mirror Angle(Optical)	± 14.0 deg
Mirror Reflectivity	$>80\%$ for 400-700nm laser and 0deg incident angle
Driving Voltage	≤ 250 V
Driving Current	≤ 3 mA
Dimension	21.5 x 12 x 2.95 mm
Operating Temperature	0~60°C
Storage Temperature	-20~60°C

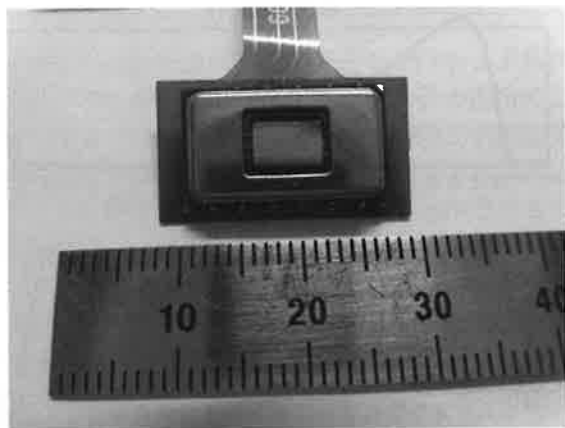


写真1 UM6004

ックのようにミラーサイズは5.5×3.6 mmである。走査方向へのレーザービームの入射角30度とすると機械振り角を考慮しても5.5×2.6 mmくらいの走査アパーチャーを得ることができる。

また、共振周波数は600 Hzなので後述するが駆動波形にはこの周波数を含めないようにしなければならない。外形は写真1のように小型でセンサに組み込むには適している。レーザーの入射方向は走査方向と同一にする必要があり、角度が付くと走査が湾曲する。

2-2 ラインジェネレーター光学系

ライン走査をするためレーザービームをライン状に変換する必要がある。

アナモルフィックの光学系で例えばシリンダレンズやロッドレンズを用いてレーザービームを引き伸ばす方法がある。こちらで生成されるラインは元のビームがガウス分布をしているためラインでのパワー分布は中央が高い分布となる。したがってパワー分布を良くするとレーザーの結合効率が低くなる。

DOE（回折光学素子）でラインを作る方法もある。この場合には多分岐で細かいドットを並べる設計が多いので、入力するビームと使用する作動距離において分岐角が近い場合には良いのだが異なるとビームが離れてリップルが出たり、逆に重なって干渉により分布が悪くなる場合がある。

また、プラスチックベースの製品では近紫外の波長では材料が劣化する場合があるので注意が必要である。均一で高効率のライン光源を作る方法としてデガウスプリズムがある。パウエルレンズとも呼ばれる光学素子は米国のパウエル博士によって発明された。

ガウス分布を均一に分配する形状をもったプリズムで現状標準品としてもいくつかのメーカーから供給されている。この光学素子は設計と実入射ビームが合っている場合には性能を発揮するが、合っていない場合には分布が極端に悪くなる。標準品として販売されているものはヘリウムネオンレーザーの $\phi 1$ mmビームの設計となっているものがあるがこれに通常の半導体レーザーの数mmのコリメート径を入れるとラインの両端が極端にパワーが大きくなる分布となってしまう。

また、アナモルフィック光学系では入射面と直角にビームを入れないとラインが湾曲してしまい、直線性の仕様が厳しい場合には調整機構が必要になる。

2-3 レーザー、コリメーター

ライン幅方向は作動距離を中心とした検出範囲内で変化が少ないことが望ましいが通常のレーザー光学系と同様にビームウエスト径は集光NAに依存するため、細いラインを作ろうとすると作動範囲が狭くなってしまふ。

仕様に合ったコリメート径を作ることが必要であるが、近年検査の高速化から高出力を求められることがある。この場合絞りなどで光束径を遮蔽するとパワーが低下するので工夫が必要である。

また、高出力では半導体レーザーではマルチモードレーザーとなり発光点サイズが大きくなり、ストライプ方向は発光分布がガウス分布ではなくなる。発光点サイズは光学倍率でそのまま大きく投射されるので設計に考慮する必要がある。

発光点サイズが設計で許容できない場合にはシングルモードレーザーでは100%に近く偏光しているので2本のレーザーをP、S偏光として足し込んで倍のパワーとすることも行われている。

3. 光MEMSスキャナーの駆動方法

3-1 共振モード

ミラーは、質量・構造・バネ定数で決まる固有振動周波数で共振する。

共振を利用すると、小さな加振力で大きくミラーを振ることができ、高速動作が可能となる。複雑な動きはできないため、共振は一定の往復運動で十分な用途に利用される。

共振モードで駆動するためには、ミラーの共振周波数と同じ周波数の正弦波または矩形波の電流/電圧信号を入力する。矩形波を入力した場合でも、ミラーの振れ角は正弦波として動作する。

共振周波数で動作させたときの光学的振れ角は、他の周波数のときの光学的振れ角とは大きく異なり、共振周波数以外で駆動すると、任意の振れ角が得られるように駆動電流/電圧を調整しても、予期しない光学的振れ角となってしまう。

また、駆動電流/電圧に対して、光学的振れ角には位相遅れが生じ、温度依存性があるなどの特徴がある。

共振モードで駆動する場合には、優れた温度安定性をもつ基準信号発生器から生成された駆動信号を用いる必要がある。

3-2 非共振モード

逆に共振を利用しない動作を非共振モードといい、高速動作には適していない。

駆動電流/電圧とミラーの光学的振れ角の関係は通常直線性に優れており、駆動電流に対して高い角度再現性をもっていない。

非共振モードはミラーが共振しないように、ミラー固有の共振周波数よりも低い周波数で駆動する必要があり、通常、共振周波数の1/10~1/5以下の周波数で

駆動させる。

特に高速動作の場合や、共振周波数に近い周波数で駆動する場合は、同じ電流/電圧で駆動していても、共振周波数に近づくとも最大光学的振れ角を超えてしまうことがあるので、注意が必要になる。

この共振周波数は単に繰り返しの周波数ではなく、波形に含まれる周波数も含まれる。正弦波では周波数は単一であるが三角波、ノコギリ波、矩形波となるにしたがって高い周波数が含まれるようになる。先ほどのULTIMEMSのUM-6004Bは共振周波数600 Hzなので仮に10 Hzのノコギリ波を入れてもその周波数が含まれるためニアに駆動できない。そのため図1のようにノコギリ波から600 Hz成分を含まない波形として駆動する。この制御信号に対してのドライブ電圧波形はデバイスの構造によっても異なるが、ULTIMEMSでは2chの駆動入力に0度を挟んで両極で駆動する形となっているので図2のような波形を入力する。この場合の駆動電圧は200 V以上になる。

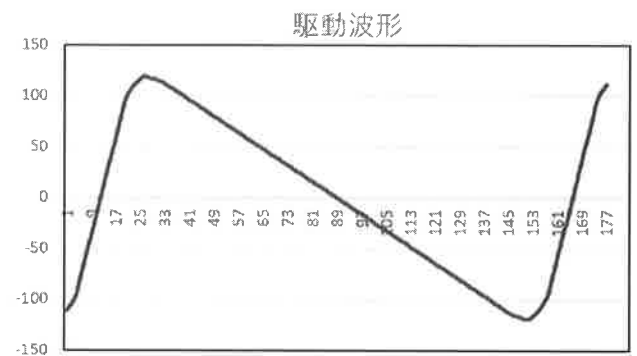


図1 波形

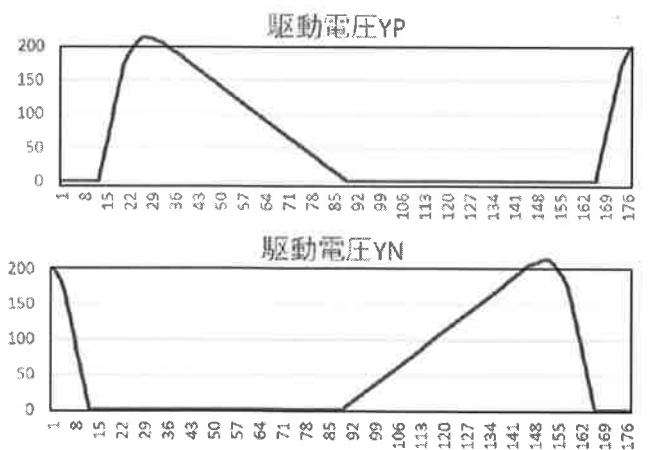


図2 駆動電圧

また、この駆動波形は駆動電流／電圧と振幅のリニアリティが無い場合には補正した信号を与える必要がある。

4. 半導体レーザーの駆動方法

レーザー स्कャンプロジェクターではレーザーをCW点灯、デジタル変調、アナログ変調することができる。デジタル変調ではレーザーを任意の出力にてON/OFFさせ、高速での変調が可能となるので、任意のグレイコードパターンを投影することが可能である。このドライブにはACCやサンプルホールド形のAPC回路が使用され、駆動電流にもよるが数MHzまでの変調が可能である。

アナログ変調は、デジタル変調よりはAPC回路を使用しているため高速動作には適していないが、任意の波形を入力して、レーザーを点灯することができるので、正弦波の位相をずらしながら投影することで、位相シフト法のプロジェクターとして使用することもできる。変調周波数はこちらも駆動電流にもよるが10 kHzくらいまで可能である。

ただし、レーザーの閾値電流付近では直線性が崩れるため、入力波形の微調整が必要になってくる。

また、高出力レーザーの高速変調には注意が必要である。電流が大きいためレーザーのリードなどがインダクタンスとなり電流の立ち上がりを妨げる。このためドライバ基板とレーザーダイオードを短く繋ごうとすると、放熱ルートの確保が難しくなる場合がある。

光学系の要求、電気回路の要求と放熱の機構要求の整合を取っていく必要がある。

5. スキャンプロジェクターの製作

写真2は当社で製作した例で、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となっている。レーザーの放射角32×38度で波長520 nmの緑でレーザーのスイッチングにより100 kHz以上の変調でラインを形成することができる。照射エリアとしては作動距離400 mmで200 mm角のエリアを3次元係争することができ、フレームレートは100 Hz近くまで可能である。デジタル変調とアナログ変調の組み合わせも可能で正弦波プロファイルの変調波形やさらにその波形の位相シフトなども可能となっている。



写真2 レーザー स्कャンプロジェクター

6. おわりに

IoTやスマートファクトリーでセンサの要求は多いが、小型、軽量、省電力、高速サンプル、高精度と仕様を並べられると選択肢が少なくなってくる。

その中で光MEMSスキャナーを利用したセンサは従来できなかったような仕様を実現できる可能性を秘めている。

今後の発展を期待したい。

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー(株) 代表取締役

藤田修平

エーエルティー(株)