

# ガルバノスキャナの特徴と応用

エーエルティー(株) 高野 裕・立尾 知之

## 1. はじめに

ガルバノスキャナはポリゴンスキャナー、光MEMSスキャナーなどの光学スキャナーと比較して、標準品が豊富で広く使用されている。

用途としてはレーザーマーキングやレーザードリリングの他に微細加工などの加工分野やOCTなどのバイオメディカル分野、3次元計測や検査装置などの検査・計測分野で使用されており、エンタテイメントではコンサートやテレビ番組でのレーザーショーもある。

本稿では、光学機械スキャナーの特徴を比較してガルバノスキャナの使用方法和特殊用途について紹介する。

## 2. 光学スキャナー

光学スキャナーは機械スキャナーと光電気スキャナーに分けられる。機械スキャナーは1面のプリズムを回転させるモノゴンスキャナー、多面体のポリゴンミラーを回転させるポリゴンスキャナーの回転タイプと、1面ミラーを往復回転させて止められるガルバノスキャナ、共振周波数で往復回転するレゾナントスキャナーがある。

光MEMSスキャナーも機械スキャナーの一種で小さいミラーを1軸または2軸の梁で支えて、静電力や電磁力、圧電効果によって駆動する。

こちらも共振タイプと非共振タイプがあり非共振タイプでは任意の位置に止めることができる。

光電気スキャナーは結晶内に超音波で回折格子を形成してビームの方向を制御するAOD（音響光学偏向

器Acousto-optic Deflector）や電界によって方向を制御するEOD（電気光学偏向器Electro-optic Deflector）があり、偏向角は小さいものの高速でスキャンする特徴がある。近年ではKTN結晶で偏向角も改善されているものも商品化されている。光学スキャナーのパラメーターとしてはミラーサイズ、振り角、走査周波数が大きな要素である。そのほかに使用波長、パワーと走査方向での走査速度の均一性と走査方向と垂直方向での走査の均一性がある。

### (1) ミラー

ミラーサイズは光学系で決まりLiDARでは投光ビーム径や最低受光光量などで計算された以上の面積が必要となる。振り角は必要なスキャンエリアから決まり、入射角が決まるとミラーサイズが決まってくる。この大きさが有効ミラー面で加工方法によってミラーの外周にはダレやソリが発生するのでその分を見込んで実際のミラーサイズを決める必要がある。

ポリゴンスキャナーではアルミ合金を鏡面切削で加工していくので有効エリアとしては周辺から1 mm内側が使用でき、平面度は $\lambda/4$ 程は確保できる。

反射面はアルミなのでそのまま使用できるが酸化を防止するためと反射率を上げるために通常SiO<sub>2</sub>、MgF<sub>2</sub>などのコーティングを施す。

ポリゴンミラーは多面体であるが加工上分割角度が角度単位で数分程度ばらつく。これは「面分割エラー」と言われ、回転数に変動が無くても走査時間の変動になってしまう。そのためポリゴンスキャナーを用いるシステムでは走査開始点にセンサーを配置してこの信号に走査クロックを同期させることで走査間の変動を無くすようにしている。

ガルバノスキャナはシリコンや石英、ガラス基材を使用するので反射コーティングが必要である。平面度

と有効エリアは加工方法とミラー厚によって変わってくるので確認が必要である。反射コーティングとしては可視光では銀、アルミで赤外では金が用いられ、必要に応じて保護コーティングが施される。特定波長では誘電体多層膜も用いられるが、ミラーの振り角によって入射角度が変わるのでコーティングの設計が必要である。

また高精度な走査が必要な場合には駆動軸とミラー反射面の平行度もパラメーターになる。これには二つの要素があり、一つはミラーホルダーに対する平行度でこちらは接着時の精度になる。もう一つはミラーホルダーと軸との嵌合精度で、どちらも平行度が出ていないと走査に湾曲が生じる。

光MEMSスキャナーは母材がシリコンなのでこちらも反射コーティングが必要である。平面度と有効エリアはこちらも製造方法や駆動方法によって変わるので確認が必要である。電磁方式でムービングマグネットではミラーの裏面にマグネットの接着があるし、ムービングコイルではミラーにコイルがあるので発熱の影響もある。

静電タイプでは櫛歯の電極が裏面に形成されることもあるので平面度に影響する。

コーティングはガルバノと同様でアルミ、銀、金が用いられることが多い。可視光でRGBを使用する場合には金コーティングはグリーンより短い波長の反射率が落ちるので注意が必要である。

### (2) 走査変動

走査方向の速度変動は走査ジッターと言われ、ポリゴンスキャナーではモータの回転ジッターや光MEMSスキャナーでは非共振側の共振周波数混入が問題になる。

走査方向と垂直方向の偏差はポリゴンスキャナーでは各面の加工バラツキによる「面倒れ」があり、ガルバノスキャナや光MEMSスキャナーでは往復での走査位置の差を「ウォブル」と呼び、どちらも走査の均一性を損ねるものである。

ただこの量は面倒れではレーザープリンターを例にとると、解像度600dpi（1インチに600ドット）ではドットピッチが42 μmになり、仮に20%エラーを許容するとして、スキャナーから走査面までの距離を180 mmとすると角度として10秒くらいになる。これらの量は非常に小さいので光学スキャナーだけではスペックに入らないので面倒れ補正光学系やジッター補正電気回路などで補正することがある。

光学スキャナーの各パラメーターは相反する関係になることがある。

大型のミラーではミラーのイナーシャが大きくな

り、トルクを稼ぐためにローターの重量も増して周波数の低下に繋がる。ポリゴンスキャナーでは面厚が増してミラーサイズが大きくなっていくと風損の影響を受けるし、光MEMSスキャナーでは共振周波数の低下をもたらす。

### (3) 走査角度

走査角度はポリゴンスキャナーでは面数に依存するだけで入射ビーム径と入射角度の設定で比較的に自由度がある。ガルバノスキャナでは構造がボイスコイルモータになっているのでリニアなトルクが得られる磁気回路と角度エンコーダーが問題になる。角度エンコーダーは以前には静電容量型が用いられていたが温度ドリフトの問題から現在は光学式が主流となっている。光学式もリニアタイプやデジタルタイプなどいくつかの方式があり高分解能のために逡倍して処理する場合もある。光MEMSスキャナーでは非共振動作は駆動力とシリコンによる梁の塑性変形で制限されるので大きい角度を取ることは難しくなる。

またガルバノスキャナと比較すると共振周波数が低く、駆動系の剛性が低いので共振周波数の影響を受け易くなる。

ラスタースキャンでは副走査側をノコギリ波で駆動することが多いが、ガルバノスキャナではそのままの波形を入力しても問題ない。

ただ制御時定数があるので指令信号に対して実際の動作は図1のように遅れて、ラスタースキャンで必要なりニア領域はミラーサイズが大きく、振幅が大きく、周波数が高くなるにつれて割合が低下していく。

光MEMSスキャナーでは駆動波形に共振周波数が含まれると走査ジッターが増える。したがって駆動波形は共振周波数でローパスフィルタを入れたような波形

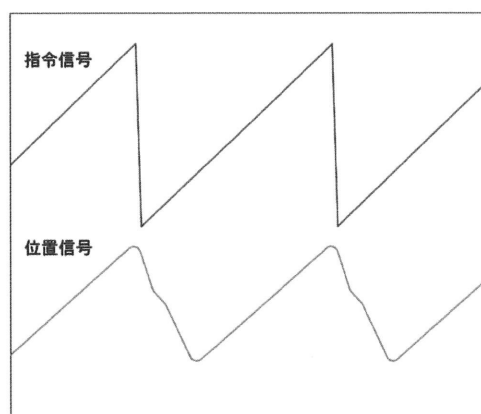


図1

にするかドライバー回路で共振周波数を含まないようにフィルタリングする必要があり、波形としては図2のようになる。

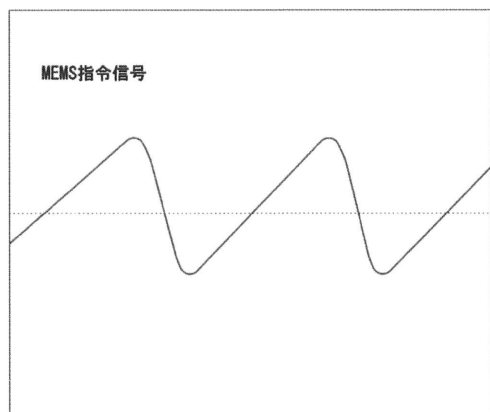


図2

#### (4) 走査周波数

ポリゴンスキャナーでは走査角度が小さければ面数を増やすか回転数を上げるにより走査周波数を上げることができる。この場合の上限はモータのパワーとジッター特性でモータへの駆動電流からドライバーの電源電圧も関与する。ガルバノスキャナでは同じミラー面積とした場合にはミラーとローターのイナーシャと駆動トルクで走査周波数の上限は決まってしまう。

ミラーの平面度が規定されている場合には高速動作でのミラーの変形も考慮する必要がある。ミラーマウントの形状やミラー材質も加速度によって検討する必要があり、剛性が高く軽量のベリリウムでミラーを作ることもある。

走査周波数を上げるためにはドライバーのチューニングも要素となる。アナログドライバーではPIまたはPID制御を行っているが使用用途に応じたチューニングで応答度が上がることがある。

最近ではデジタルインタフェースのガルバノも多く使用されることになったが、こちらではチューニングの変更が比較的容易なのでユーザーでも変更できる製品もある。また通常16bitの角度設定で分解能が高く、ドリフトも少なくなっている。

光MEMSスキャナーの2次元タイプでは主走査方向は共振構造になっているため比較的大きな振幅と高い走査周波数を得ることができる。

ただこの周波数は機械的な共振周波数に依存するため同一機種でも5%くらいのばらつきが生じる。このためラスタースキャンで画像を作る場合には画像のピクセルクロックは共振周波数によって調整できるようにしておく必要がある。

#### (5) 走査歪

ポリゴンスキャナーは一定回転数で回っているので等角速度で、これを平面に走査した場合には角度とスポット位置は距離を $f$ とすると $f \times \tan \theta$ になる。レーザープリンターでは電子写真プロセスでの画像品質は等エネルギー分布が望ましいので走査速度の等速性が求められるし、電気制御でもデータの送り出しクロックを変化させるのは大変なのでこちらでも等速性が求められる。これを光学的に補正するのが $f\theta$ レンズで、角度に対してリニアなスポット位置が得られる。

さらに機能としては焦点の像面湾曲を補正して走査面にビームウエストを持っていくことができる。ガルバノ制御でZ軸が出てくる場合があるが、このZ軸はフォーカス制御でこの像面湾曲を補正して $f\theta$ レンズ無しでも走査面にフォーカスを合わせる制御ができる。

ラスタースキャンでは走査の直線性が求められるが、走査方向と入射ビーム方向に角度が付くと走査面が湾曲する。

ポリゴンスキャナーでは「軸倒れ」と呼ばれる取付基準面に対しての回転軸の直角度の偏差がある。オーダーとして角度で数分であるが精度が必要な場合には考慮する必要がある。

またポリゴンスキャナーとガルバノスキャナを組合わせてラスタースキャンするのは多く用いられているが、主走査のポリゴンスキャナーから副走査のガルバノスキャナへの光線は中心以外では角度をもって入射するため周辺が湾曲していく。

ガルバノスキャナを2軸使って走査する場合も同様に走査の湾曲が発生するし、XミラーとYミラーの間隔により走査面での $f\theta$ 特性が異なるためデータの補正が必要である。光MEMSスキャナーでは同軸で2軸走査ができるが、歪まないためには正面から入射しなくてはならず現実的ではない。そのため画像歪を無くすには画像処理が必須になる。

反射点の移動が光学特性に影響する場合がある。

ポリゴンスキャナーでは「面出入り」と呼ばれる反射点の移動があり、円周と円弧の関係になるので面数が少なく内接円が大きいほど差が大きくなる。

ガルバノスキャナではミラーのホルダーへの取付方法で変わってくる。反射面が回転軸を通るような設計では問題ないが、平面度を上げるため厚いミラーを取り付ける場合にはマスバランスからミラーの形状中心

を回転軸にすることがある。この場合にはミラー厚さの半分が回転軸からシフトすることになり反射点の移動が発生する。

#### (6) 電源

ポリゴンスキャナの電源電圧は通常24 Vであるが、回転数が上がるとモータの逆起電力によって有効電力が減ってしまうので電源電圧を上げる必要がある。高回転では36 Vや48 Vになることもある。

ガルバノスキャナも同様で高速動作では電流が大きくなる。通常電源電圧±15 Vであるが±24 Vも選択できる場合があるので高速動作では高い電圧を設定した方が有利である。またミラーの折り返し点では制御量が最大になるのでピーク電流が大きいタイプの電源を使用する方が望ましい。

光MEMSスキャナは省電力なので電磁タイプでは10 V以下での駆動である。ピエゾタイプでも数10 V以下の駆動電圧だが静電タイプでは数100 Vの電圧が必要な場合がある。

#### (7) 取付

ポリゴンスキャナでの高回転はエアスピンドルを用いることで70000rpmも可能である。ただモータの発熱量が大きくなるので本体の放熱の他にミラー周辺の空気の流れも考慮する必要がある。

空気の屈折率は温度によって変わるので熱い空気が流れるところではレーザーの光路が空気の屈折率の変化で曲げられ面倒れのように振舞うことがある。

ガルバノスキャナでもコイルによる発熱は同じなので高速動作をする場合には放熱が必要である。特にエンコーダーの温度上昇はドリフトの原因となるので取付フランジの位置も大切である。

また取付フランジはガルバノスキャナを取り付けるだけでなく熱抵抗を下げる必要があるので、穴に通してネジで止めるのではなく、すり割りや締め込むか2部品で挟み込んで取り付けて取付面積を確保する必要がある。

小型のガルバノスキャナを高速で動作させるとかなりの高温になり、熱抵抗を下げるために放熱グリスを用いることがあるが、この場合に放熱シリコンを用いるのは避けた方が良い。長時間の使用でシリコンが昇華して光学部品を汚す恐れがある。高精度のガルバノスキャナでは本体にヒーターと温度センサーが付いていて温度制御するタイプがあるが、こちらの取付は逆に熱抵抗を大きくして温度制御の負荷を小さくする必要がある。エンブラやセラミックで熱絶縁をして取り付ける必要がある。

光MEMSスキャナは投入電力が小さいので放熱の必要性は少ない。

ただ取付に関しては駆動方法や構造により制限があり、静電容量型では容量で角度検出しているため金属部分とある程度の距離が必要になる。またミラーの両面が使用できるタイプでは空気の負荷のため裏面にある程度の空間が必要になる。

### 3. 高速ガルバノスキャナ

列車の安全走行にはレールの管理が必要で2本のレールの軌間寸法と、高低を計測する必要がある。近年では検査車両も高速化されているが終電から始発までの作業時間だけでは管理間隔が制限されることから営業車へ検査ユニットを載せることも検討されている。レールの軌間寸法や高低はレールの摩耗による形状変化やカーブにおけるカント量などもあり特定ポイントで測定することが難しく、ある程度のレール形状を測定する必要がある。

このため変位計を高速にスキャンしてレールの形状を測る必要があり、このスキャン速度は当然のことながら列車の走行速度が上がれば早くなる。小振幅での応答度は1 KHz近くが要求され、レーザー変位計の計測中心距離から受光アパーチャーは数10 mmくらい必要になる。投光アパーチャーは受光より小さくなるが基線長があるのでミラーサイズとしては20×40 mmくらい必要になるができるだけ重量を減らすために三角形の形状にした。

通常のガルバノスキャナでは回転ミラーは片軸で駆動されることが多いが、高速駆動で発生する軸のねじれとダイナミックなアンバランスによって片軸駆動の場合にはミラーの平面度が悪くなることやウォブルが大きくなる可能性があるのと使用環境上振動の影響が予測されるためミラーの反対側にも軸受けを設けた。

エンコーダーは1回転当たり256,000rpsで微小角での制御も可能にしかつ高速制御ということで、フィードフォワード制御を採用した。

通常のガルバノスキャナではエンコーダー信号と目標位置の差をできるだけ早く収束させるためにフィードバック制御が多い。フィードフォワード制御は予め計算または実測されたデータに基づいて現在位置から予想された制御量で動作させる方法で高速動作に適している。形状としては図3のようになっている。

### 4. LiDAR用ガルバノスキャナ

LiDARはレーザー光をパルスまたは変調させて投

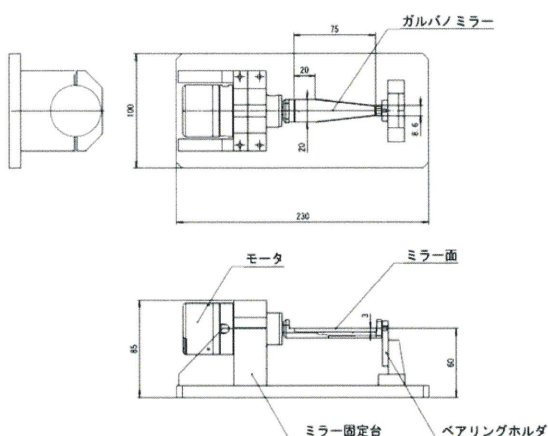


図 3

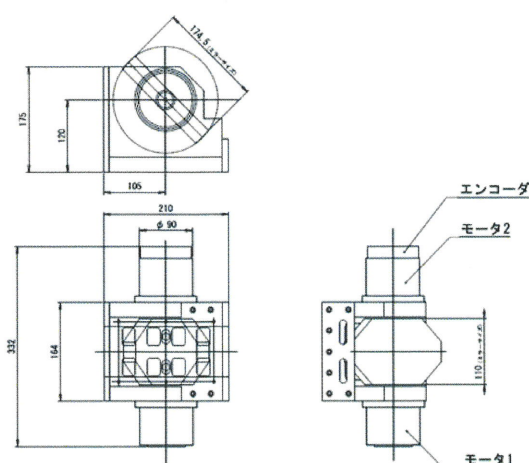


図 4

射してその反射光を受光することで対象物への距離を測定する。あるエリアの距離データ分布を得ようとするLiDARの光軸をスキャンしなくてはならず、ガルバノスキャナを使用することがある。

この際のミラーサイズは測定分解能に必要なターゲット面でのビームサイズを実現するための投光アパーチャーとその時のレーザーパワーと対照反射率と反射特性によって得られる最低受光量によって決まる受光アパーチャーになる。

以下は衛星に搭載して地上の植生を計測するためのLiDARの地上実験モデルに搭載された例である。

レーザーは地表で安全となるクラスでビーム径と出力が設定され、それに対して軌道上での最低受光量を考慮するとミラーサイズとして110×174 mmが必要となった。スキャン周波数は10 Hzが必要からそのトルクを発生するモータを設計し、角度制御が1秒ということから1回転で81,000パルスのレーザーエンコーダーを16週倍することにより分解能を達成している。モータはボイスコイルモータ形式であるがトルクの確保から2モータ構成としている。

制御はフィードバック制御で高分解エンコーダーの信号を使用しており、外形としては図4のようになっている。

りデジタルガルバノに代表されるようにインタフェースも変わってきた。

ガルバノスキャナも使用用途の拡大とともにいろいろなバリエーションが出てくると思われるが、今後の発展を期待したい。

## 5. おわりに

センサーも従来の点から1次元エリア、さらに2次元エリアと変わりつつある。

光学スキャンも高速、高精度を要求されるようにな

### 【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

立尾知之

エーエルティー株式会社