



テクニカルハンドブック スキャン計測

2023年5月

エーエルティー株式会社

〒176-0014東京都練馬区豊玉南 1-21-10

TEL 03-5946-7336 FAX 03-5946-7316

<http://www.alt.co.jp>

e-mail: info@alt.co.jp

目次

1. ガルバノスキャナの特徴と応用
光アライアンス2023年5月
2. 光 MEMS スキャナのダイナミック平面度計測
光アライアンス2017年1月
3. 走査ビームのプロファイル計測と光 MEMS スキャナへの応用
光アライアンス2016年1月
4. ダイナミックビーム計測へのアプローチ
光アライアンス2015年1月
5. 走査レーザビームの計測
光アライアンス2013年1月
6. 2次元走査 LRF
光アライアンス2012年4月
7. 光 MEMS スキャナの計測
光アライアンス2012年1月
8. レーザスキャンと光 MEMS スキャナ
光アライアンス2010年8月
9. 光 MEMS スキャナの評価・検査システム
Op l u s E 2012年1月
10. レーザビーム径の測定
光アライアンス2010年1月
11. レーザ走査による外形測定器の試作
トランジスタ技術2009年12月
12. 産業界で使用されているビームプロファイラー
光アライアンス2009年1月
13. MEMSスキャナの測定
光アライアンス2008年1月

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・計測分野に使用されており、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SiO₂、MgF₂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にアルミ、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、ガルバノスキャナーや光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ベ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。ガルバノスキャナー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ー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、ガルバノスキャナー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リ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

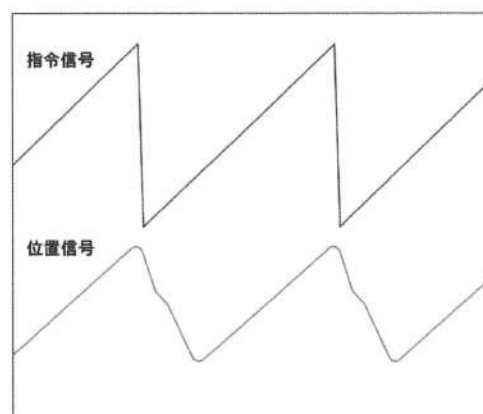


図1

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。

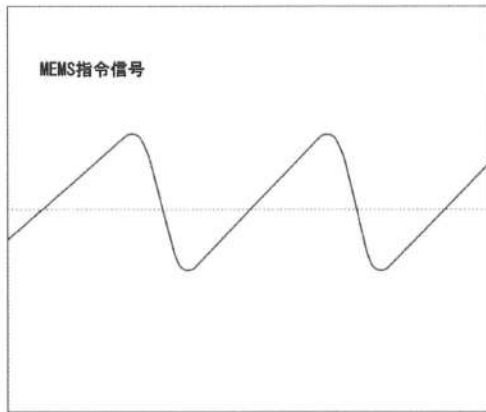


図2

(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こることができる。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、すり割りで締め込むか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。エンブラヤ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

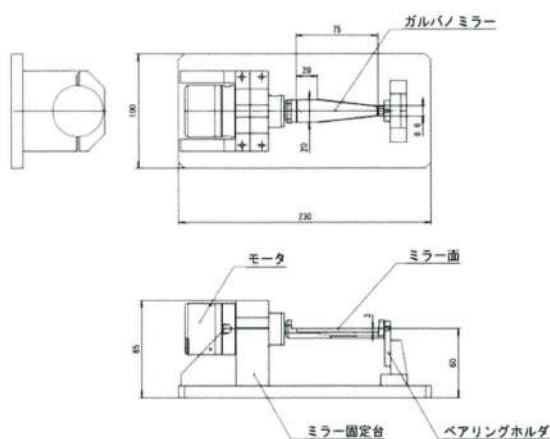


図 3

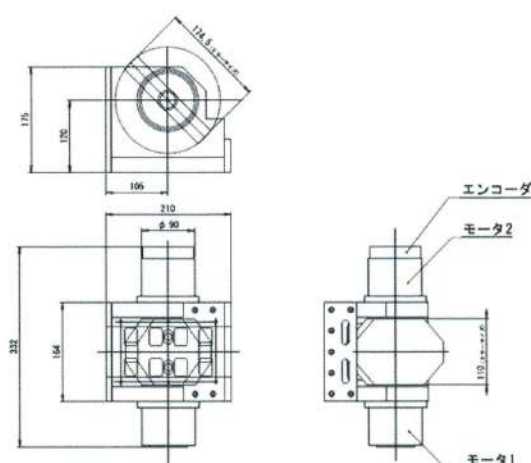


図 4

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

光MEMSスキャナのダイナミック平面度計測

＝振動中の光MEMSスキャナのミラー平面度計測＝

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

超小型の光MEMSスキャナにより従来のピコプロジェクターやヘッドアップディスプレイの他に網膜走査ディスプレイや空間立体ディスプレイなど応用が広がっている。

MEMSはMicro Electro Mechanical Systemsの略でこのスキャナは超小型、省電力で機械スキャナとしては長寿命という特性を持っている(図1 OPUS社の光MEMSスキャナ)。

現在の解像度も720Pと呼ばれる横1280ピクセル、縦720ピクセルのハイビジョン画質となっているが今

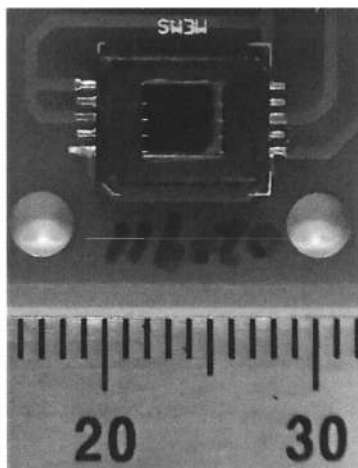


図1

後4 K、8 Kへもスキャンミラーによるフォーカスフリー機能と画像があるところだけレーザーが点灯する省エネルギーとフルレーザーによる色再現性で発展していくものと考えられる。

スキャンミラーの方式はデジタルミラーデバイスと呼ばれるDLPや液晶シャッターのLCOSと比較して上記のメリットがあるが、MEMSスキャナの性能により画像品質が低下する場合がある。

低下の要因としては水平スキャンでは走査ジッタと呼ばれる走査時間の変動がある。

通常は水平方向が主走査となり共振で動作させることが多く、周波数は20 KHzを超えるが副共振があったり副走査側の走査の影響を受けて走査速度が変動したりして水平方向のポインタピリティーが悪くなる。垂直スキャンではウォブルと呼ばれる垂直方向の変動や垂直方向の走査リニアリティーの変動がある。

通常垂直方向は副走査となり非共振動作しフレームレートの数10 Hzで動作させる。ウォブルは主走査動作時の副走査側の変動でミラー駆動力がアンバランスやミラーを支えている梁のコンプライアンスが不均一などにより発生する。

また副走査は非共振で動作させるがこちらも共振周波数を持っており、通常ディスプレイ用のφ1 mmくらいのMEMSスキャナでは1 KHz付近の一次共振点の他にいくつかの高次共振点を持つことが多い。

ここにノコギリ波のような駆動周波数を直接与えてしまうと、元の基本周波数は低いものの高次の周波数も含まれるので共振点付近の周波数が発生したタイミングで走査の不均一が発生する。

このような要因で主走査方向、副走査方向のポインタピリティーが悪化するが、この他に画像の周辺であ

る主走査、副走査の走査開始、終了付近での解像度の低下が見られることがある。

この要因の1つとしてミラーの平面度の低下がある。

MEMSデバイスはシリコンで形成された数mmのミラーを電磁力、静電力、ピエゾの歪みなどで加振し一次元または二次元でスキャンする構造となっているが共振周波数を上げようとするミラーが薄くなり平面度の維持が難しくなってくる。

近年では有限要素法のシミュレータで詳細なシミュレーションができるようになったがプロセスの精度や諸条件の変化によりなかなか設計通りの性能が得られておらず、動作時のダイナミックな平面度測定が求められている。

ダイナミックな平面度計測は平面度を測定する方法と、走査されるビームのダイナミックなビーム径を測定する方法がある。

実際のスポットでは副走査方向は光学的なビーム径であるが主走査方向については光学的なビーム径の他にレーザーのスイッチング特性が関与してきてメリット・デメリットが生じる⁽¹⁾⁽²⁾。

2. ダイナミック平面度計測の原理

ダイナミックな平面度計測としてレーザー干渉計とパルスレーザーによる干渉計測を用いて動作中のMEMSスキャナのミラーの平面度計測を行った。

レーザー干渉はニュートンリングのように光路差をナノメートルオーダーの分解能で検出することができミラー表面の微妙な変形を計測することが可能である。

図2が実験測定系で半導体レーザーは波長660 nm、出力30 mWでnsオーダーでの点灯制御が可能である。レーザーから発せられたビームはスペシャルフィルタ、コリメータレンズを介してビームスプリッタから光

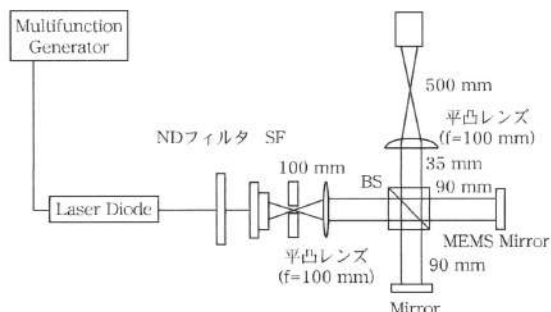


図2

MEMSスキャナのミラーへと照射される。

ビームスプリッタでは基準ミラーへもビームが分岐され反射してCCDカメラへ入射される。

この時CCD画像素子上では基準ミラーの参照光と光MEMSスキャナの物体光は傾いて伝播していくので干渉縞を生じる。

この干渉画像からフーリエ変換で位相差を求めることができ表面形状を計測することができる。

パルスレーザーの発光タイミングは光MEMSスキャナのドライブ信号から検出し、タイミングのディレイと発光パルス幅の制御を行った。

3. 測定結果

光MEMSスキャナは22 KHzで共振動作させ、カメラの視野は光MEMSスキャナのミラー角で±9度となった。レーザーの点灯パルスは25 nsと50 nsで評価した。カメラの視野はVGA解像度でほぼミラーサイズであるが位相検出のため約0.7 mm角を切り出し、位相アンラッピングを行った後、平面でフィッティングして残差を平面からのずれとして評価した。

パルス幅25 nsの結果を図3にパルス幅50 nsの結果を図4に、市販のアルミ平面ミラーを図5に静止時の光MEMSスキャナのミラーを図6に示す。

平面とのずれはRMSでパルス幅25 nsでは22 nm、パルス幅50nsでは62 nm、アルミ平面ミラーでは28 nm、静止時の光MEMSスキャナのミラーでは23 nmであった。

RMS値については平面に近い値では $\lambda/20$ 以下の値が得られており、測定分解能としては十分な値と考えられる。

パルスレーザーの発光パルス幅は短いほど解像度が上がるが発光パワーとカメラ感度により露光時間が長

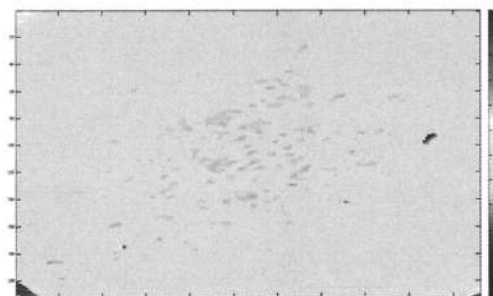


図3

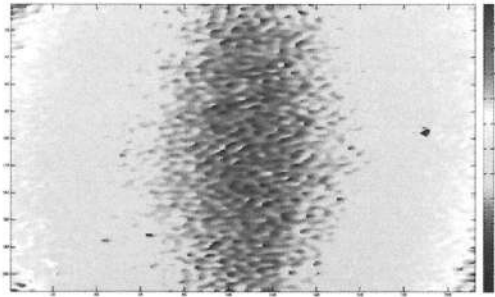


図 4

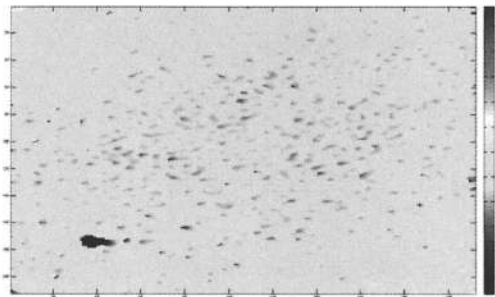


図 5

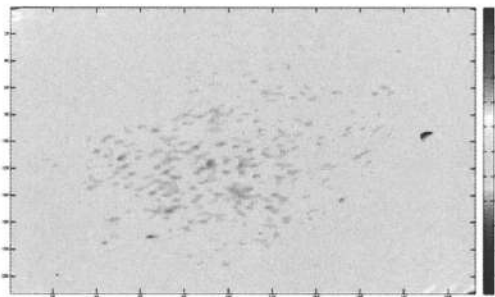


図 6

くなり、光MEMSスキャナ短時間の変動が見られなくなる。

今後レーザー、カメラなどのデバイスの改善およびフーリエ変換、画像選択からアンラッピング処理などソフトの改善を進める。

4. おわりに

本開発は電気通信大学との共同研究で行い、実験に携わっていただいた大学院情報理工学研究科 中澤誠人さん、実験計画および理論背景をご指導いただいた宮本洋子准教授に感謝を申し上げる。

＜参考文献＞

- (1) 高野裕：ダイナミックビーム計測へのアプローチ、光アライアンス 26(1), pp.45-48 (2015年1月)
- (2) 高野裕：走査ビームのプロファイル計測と光MEMSスキャナへの応用、光アライアンス27(1), pp.34-37 (2016年1月)
- (3) 中澤誠人・高野裕・住廣正和・宮本洋子：運動物体と同期したパルスレーザーによる変形計測、日本光学会年次学術講演会 (2016)

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

走査ビームのプロファイル計測と 光MEMSスキャナへの応用

＝ダイナミックビーム計測へのアプローチ＝

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

ダイナミックビーム計測のニーズとして従来はレーザープリンタや複写機の生産ラインからの要求が多かった。これらにはLSU（レーザー・スキャニングユニット）が使用されており、印字幅内のスポットサイズを検査する場合、従来のポリゴンスキャナを停止させてビームプロファイラによって各走査位置でのビーム径を検査する検査ではタクト時間が長かったためである。ただ近年の高解像度化や高速化によってダイナミックで計測できるのは一部であった。

これに対して最近要求が出てきているのが光MEMSスキャナでMEMSはMicro Electro Mechanical Systemsの略でこのスキャナは超小型、省電力で機械スキャナとしては長寿命という特性を持っている（写真1 OPUS社の光MEMSスキャナ）。

現在ピコプロジェクターと呼ばれる超小型のプロジェクターやHUD（ヘッドアップディスプレイ）、三次元エリアセンサで商品化されているが小型、省電力からウェアラブルディスプレイへの応用が期待されている。

このデバイスはシリコンで形成された数mmのミラーを電磁力などで加振し一次元または二次元でスキャンする構造となっているが共振周波数を上げようとするとミラーが薄くなり平面度の維持が問題となっている。

これに対してダイナミックにビーム径を測定したり、平面度を計測したり「する試みが行われているが製品としては実用化されていない⁽¹⁾。ただ近年このミラーにも駆動機構を追加し焦点可変ミラーとする研究が行

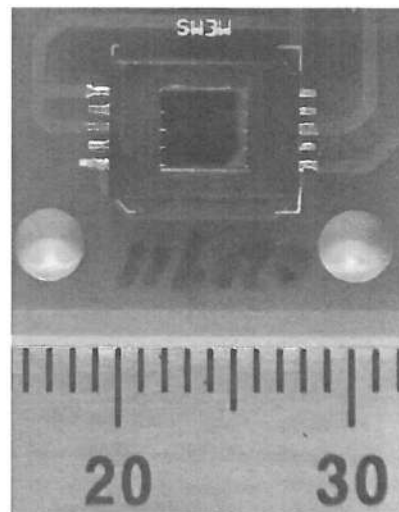


写真1 MEMS

われ、測定の要求が高まっている。

2. 焦点可変ミラー

光MEMSスキャナは半導体プロセスで製作されるので微細な構造が取れる。ディスプレイ用の二次元光MEMSは $\phi 1$ mm程度のミラーを梁で支えて共振で高速に走査する高速軸とさらにそれと直交する低速軸とで構成され、ラスタースキャンが容易なように低速軸は非共振で構成される場合が多い。

それらの駆動力は電磁力ではムービングコイルとム

<製品特集：レーザービームプロファイラ>

ーピングマグネットの構成があるがミラーが振動するので空間が必要なため磁気回路の工夫がされている。

静電力を用いるタイプはミラーの付近に櫛葉の電極を設けて、静電力により駆動する。

このタイプでは駆動力を上げようとすると100 V以上の電圧が必要になる場合があるが電流は小さいので電力としてはそれほど大きくない。

もう1つは圧電力を用いるものでピエゾ薄膜の伸縮を利用して駆動する。このタイプも電磁式と比較すると比較的大きな電圧が必要であるが、消費電力は小さく角度検出用のセンサも同じプロセスで製作することができるので量産性に優れている。従来の2軸の駆動の他に同様プロセスを用いてミラーを同芯状に変形することにより凸面、凹面ミラーが形成されビームの光学特性もコントロールすることができる。

この技術は光学システムを大幅に簡略できる可能性があり、製品への応用が期待されている。

写真2は東北大学 羽根・佐々木研究室で試作され

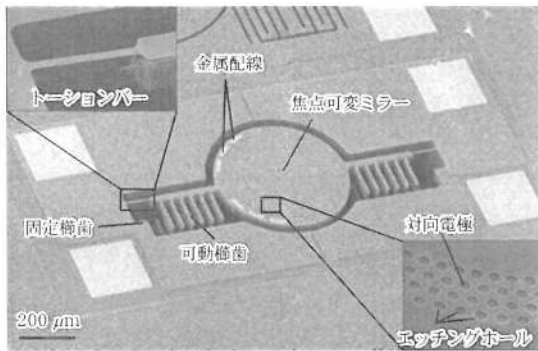
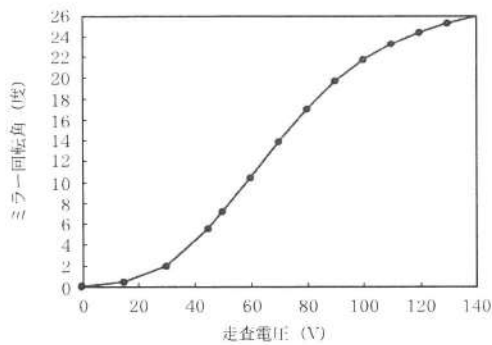


写真2 ミラー製作



(a) ミラー回転角の電圧依存性

た写真であるが図1のような構造になっており、図2はその特性である。

ミラー回転軸に対しての駆動電圧と回転角および焦点可変ミラーへの駆動電圧と表面形状が示されているが、駆動電圧によりミラーの曲率が変化しているのが分かる。

ミラーの表面形状は放物面に近似でき曲率半径は -4 m^{-1} から 20 m^{-1} まで変化できたと報告されている⁽²⁾。

3. 焦点可変ミラーの応用分野

ミラーの表面形状の制御は大型の反射望遠鏡などで

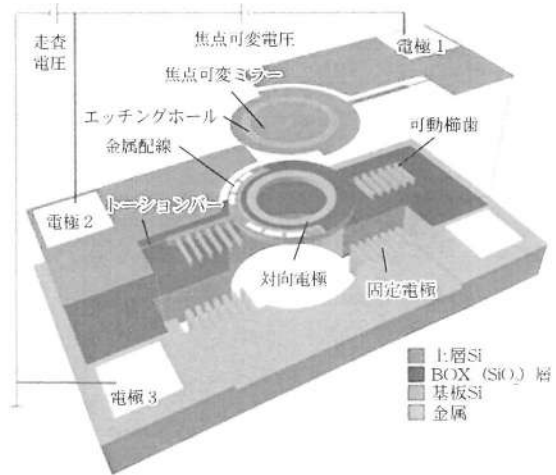
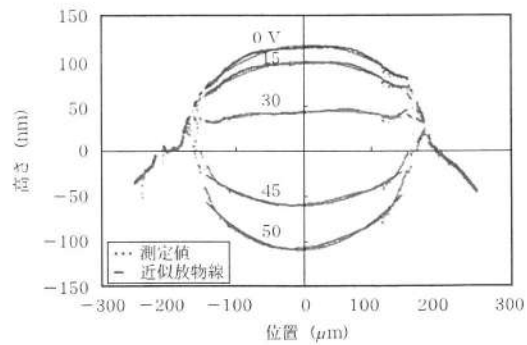


図1 ミラー構造



(b) 電圧に対するミラーの表面形状

図2 ミラー特性

ミラーの歪を補正するために行われたことはあったが、制御はほとんど静的であった。

ダイナミックにミラー形状を変えることは一部実用化されている焦点可変レンズに置き換えることもでき種々の応用が期待できる。

羽根・佐々木研究室では光学コヒーレントトモグラフィ（OCT）への応用をあげている。OCTは光干渉断層計とも呼ばれ照射したレーザーのエコー情報を再構成して断面形状を計測するもので非接触に体内部が観測できるものである。これに焦点位置を調整できる機能が付加されると深さ方向の精度が向上する。提案されている内視鏡用のOCTヘッドは図3である。

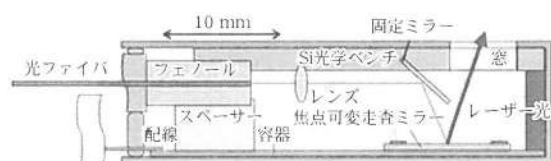


図3 内視鏡の構造

レーザープリンタではLSUの小型化、低価格化、共通化からfθレンズのないタイプの研究がされている。

これはレーザーのコリメーションユニットに焦点可変レンズを用い、光MEMSスキャナでスキャンすることによりfθレンズをなくし、像面湾曲は焦点可変レンズのフォーカス調整でfθエラーについてはクロック補正で行うというものである。ただ焦点可変レンズは現状応答度が低く形状も大きく実用化の壁となっていた。光MEMSによる焦点可変ミラーは原理的には高速駆動が可能なので将来的に期待される。

またディスプレイではレーザーสキャン方式はDMDに代表されるマイクロミラーアレイの方式やLCOSでの液晶シャッター方式と比較してフォーカスフリーのメリットがある。

これはDMDやLCOSはアレイ面に形成された画像を照射面に転送するため焦点合わせが必要であるが、レーザー스キャン方式はレーザーの広がり角とスキャンの広がり角がほぼ等しいためどこでも焦点が合う構成となっている。

ただ現状の720P解像度から解像度が上がった場合にはフォーカスフリーの関係が満足できない場合が想定されるので、これについてもフォーカス調整機能があれば解像度の向上が期待できる。

4. ダイナミック ビーム計測の技術動向

上述のようにダイナミックなビーム制御のためにはダイナミックなビーム径計測またはミラー曲率測定が必要である。

特許公報からその技術動向を調査するとダイナミックなビーム径計測には以下の3方法が出願されている。

(1) CCDカメラによる方法

CCDカメラを高速シャッターで取り込み画像からビーム径を計算する方法

特願平06-034329 ビーム径測定補方法

富士ゼロックス

特願平06-258587 ビーム位置検出方法

富士ゼロックス

特願平09-021968 レーザー走査光学系のビーム径測定装置及び方法

富士ゼロックス

特願2001-221614 走査レーザービームのビーム径測定方法

旭光学

(2) 走査ビームに対し角度の異なる

複数スリットを介して取り込む方法

CTと同様に複数の角度でビームを切り出し後で合成する方法

特願20000-310559 走査ビーム径測定方法及び装置

リコー光学

特願2006-029806 走査レーザービーム径測定方法

エーエルティー

(3) 主走査ラインPD副走査ラインCCD方式

主走査はラインPDで副走査はラインCCDから計算で求める方法

特願平06-102087 レーザービーム径測定装置

リコー

特願2003-254862 光学特性測定装置及び光学特性測定方法

キャノン

特願2007-033364 走査レーザービーム径測定装置

エーエルティー

ダイナミックな平面度測定については静的な測定で用いられる干渉計をパルスで行う方法が出願されている

特開2010-71751 ミラーの平面度検査装置

日立ピアメカニクス

5. ピコプロジェクターの要求仕様

現在市販されているピコプロジェクターは解像度が720Pと呼ばれる水平解像度1280ピクセル、垂直解像度720ピクセルが主流となっており、これにWVGAの848×480ピクセルおよびVGAの640×480ピクセルが対応可能という仕様が多い。

こちらに対応する光MEMSスキャナとしてはミラーサイズφ1 mm強で主走査が共振タイプで共振周波数約30 KHz走査角約30度、副走査が非共振で周波数約60 Hz走査角17度くらいが必要となる。

光MEMSスキャナの共振動作では走査速度は正弦波状になっており最外周では走査速度はゼロとなるため最大振幅の70%くらいしか使用できない。そのため最大振幅は主走査方向では43度以上必要になる。

これを外部から測定しようとした場合ミラー反射位置から測定点までの距離により走査速度が変化するので測定距離300 mmとした場合に最大速度は約2,4000 m/sとなる。

CCDカメラによる方法では最近のハイスピードカメラでは露光時間が100 ns以下の製品も出てきており、この場合でも上記速度では2.4 mmの移動量になってしまう。また感度が低いので光量も必要となる。

走査ビームに対して複数スリットで取り込む方法ではスリットによってビーム径を切り出す波形が必要である。仮にΦ0.1 mmのビーム径を測定しようとした場合その立ち上がり時間は4 nsとなりこの立ち上がり波形をADコンバーターで取り込もうとするとGHz帯の帯域が必要になってしまう。

また同様に主走査ラインPD副走査ラインCCDの方法でもADコンバーターの帯域は同様であるのとラインCCDにも高速が求められ実現するには難しい要素が多い。

6. おわりに

ダイナミックビーム計測やダイナミックミラー平面度計測は従来のレーザープリンタの要求からさらに厳しい光MEMSスキャナの計測へと変わりつつある。

従来提案されている方法はどれも仕様、システム価格から企業での研究開発、製造現場での適用は難しいと考えられ、新しい方式でのシステム構築が求められている。

今後の展開を期待したい。

＜参考文献＞

- (1) 高野裕：ダイナミックビーム計測へのアプローチ。光アライアンス、26巻1号（2015.1）
- (2) 東北大学 大学院 羽根・佐々木研究室 ホームページ
<http://www.mech.tohoku.ac.jp/labs/detail.php?cid=9&pid=450>

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

ダイナミックビーム計測へのアプローチ

＝走査中のビームプロファイル計測と光MEMSスキャナへの応用＝

エーエルティール 高野 裕

1. はじめに

ダイナミックビーム計測のニーズとして従来はレーザプリンタや事務所などに設置されている複合機の生産ラインからの要求が多かった。

これらにはLSU（レーザスキャニングユニット）が使用されており、レーザとポリゴンスキャナ、 $f\theta$ レンズで構成されている。特にプラスチックの $f\theta$ レンズは形状も大きいこともあり、傷、気泡、異物の他に成形条件によって脈理を生じて印字品質に悪影響を及ぼすことがある。

この検査には現在ポリゴンスキャナを回転させて、走査のジッタ、副走査の変動やトリガ信号を検査する動的な検査と、ポリゴンスキャナを停止させてビームプロファイラによって各走査位置でのビーム径とディストーションを検査する静的な検査が行われている。

この検査工程ではポリゴンミラーをプランジャーなどによって外部から所定角度に回転し、相当する走査位置にビームプロファイラのヘッドをステージで移動して測定する方法で行われている。こちらも測定ポイントが増えれば検査時間がかかるのでコストダウンからタクトタイムの削減が求められているし、数万回転に達している精密な空気動圧軸受やオイル動圧軸受のポリゴンスキャナを停止状態で強制的に回転させることによる信頼性の問題からもダイナミックな測定が求められている。

ただ最近では解像度が600 dpi（インチ当たりのドット数）や1,200 dpiになってきているので測定範囲が10～200 μm になり、レーザ走査のスキューやポー

が生じると測定ヘッドを単に走査方向に移動させるだけでなく副走査方向にも制御する必要が出てきたり、LSUの小型化から走査角度が大きくなっているので走査端でと中心ではセンサへの入射角度がかなり変化していることからのビーム径やディストーションのエラーが生じて生産ラインで使用できるものは限られたスベックとなっている⁽¹⁾。

これに対して近年要求が多くなってきているのが光MEMSスキャナの検査である。

光MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）スキャナは半導体プロセスで製造され、通常は共振型によって超小型、省電力で機械スキャナとしては長寿命という特性を持っている（写真1 OPUS社の光MEMSスキャナ）。

現在ピコプロジェクターと呼ばれる超小型のプロジ

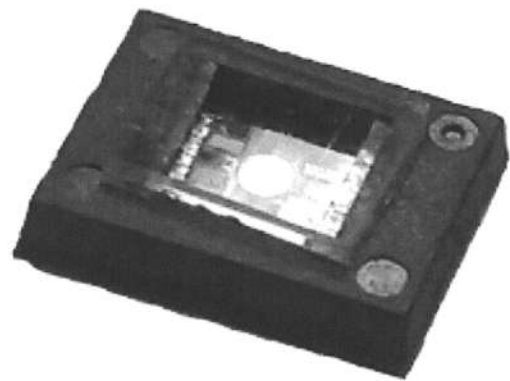


写真1 OPUS社の光MEMSスキャナ

ェクターやHUD（ヘッドアップディスプレイ）で商品化されているが小型、省電力からウェアラブルディスプレイへの応用が期待されているし、三次元エリアセンサへの応用も研究されている。このデバイスはシリコンで形成された数mmのミラーを電磁力、静電力、ピエゾの変形力で加振し一次元または二次元でスキャンする構造となっている。

従来のポリゴンスキャナやガルバノスキャナではミラーの剛性は高く、よほどの高回転でない限り停止している状態と動作している状態でのミラーの平面度は大きく変わらなかった。

これに対して、光MEMSスキャナでは共振周波数を上げようとするミラーのイナーシャを減らさなくてはいけないので、ミラーサイズが決まっている場合には厚さを減らす方向となってしまふ。現在では有限要素法などコンピュータシミュレーションが発達しているので、色々な構造でこちらを解決しようとしているが720Pのディスプレイ用では共振周波数が25 kHz前後となるため平面度の維持が問題となっている。

光MEMSスキャナでは静止状態の平面度と動作状態での平面度が異なる場合があり、これを実際のレーザビームをスキャンすることにより測定する手立てが要求されている。

2. ダイナミックビーム計測の方法

レーザプリンタ用LSUでは近年高速化が進んでいるのでポリゴンスキャナ回転数40,000 rpm、焦点距離100 mmとすると走査速度は870 m/秒となり600 dpiでのレーザ点灯時間は50 ns程度、スポットサイズ50 μm 、レーザ波長は780 nmでパワーは0.2 mW程度が測定対象となる。

光MEMSディスプレイでは走査周波数25 kHzで測定距離500 mmとすると720P解像度で走査速度22,000 m/秒レーザ点灯時間10 ns、スポットサイズ500 μm 、波長450,520,640 nmでパワー数10 mWが測定対象となる。

これらに対して現状では以下の測定方法が製品化されている。

2-1 二次元撮像素子を用いる方法

CCDやCMOSなどの撮像素子を用いる方法でビームをパルス点灯しシャッターを同期して露光する方法である。

2-2 スリット方式

ビームをスリットやナイフエッジ、ピンホールなどで遮蔽することで生じるビーム光量の時間変化を測定

し複数データからプロファイルを合成する方法である。

2-3 上記に分類されない方法

複数センサを用いて測定する方法や、平面度計測でストロボ干渉計やシャックハルトマン型波面センサを用いる方法などが提案されている。

ダイナミック測定に影響を与える要素としてはスキャンの変動とレーザの点灯方法である。

スキャンの変動についてはポリゴンスキャナではジッタによる主走査方向の変動、ミラーの面倒れなどに起因する副走査方向の変動とポリゴンスキャナの面毎の反射率によるパワー変動がある。

光MEMSスキャナについてのスキャン変動はポリゴンスキャナと同様にジッタ、ウォブルの他にミラー平面度変化がパラメータとなり、モノミラーなのでポリゴンスキャナの面毎の変動は生じない。

レーザの点灯方法の影響についてはレーザドライバーによる光出力の立上り、立下り特性とスイッチング周波数が高くなることでビデオクロックの伝送ジッタも変動の要因となる。

またレーザの放熱が不十分の場合には点灯パターンによってレーザ素子の温度変化に伴うパワー変動が生じる場合もありレーザ自身のドループ特性が影響する場合もある。

3. 二次元撮像素子を用いる方法

CCDやCMOSの撮像素子を用いたビームプロファイラは数多く商品化されているが精度を上げるためには市販のカメラは使用できない。

市販のカメラには撮像素子の前にカバーガラスや可視光カットフィルターが入っておりこれらが測定に悪影響を及ぼす。ゆえに、各社工夫をしている⁽²⁾。

さらにビーム入射角度の依存性の精度向上を図ると撮像素子に直接FOP（ファイバオプティクプレート）を配置するタイプも商品化され、旧フォトン社からPlaten Profiler model 2424Sとして販売されたこともあった⁽³⁾。

撮像素子を用いたデメリットとしては上記パルス点灯での影響を受けることとパルス幅が狭くなってくるとエネルギーが低下して1パルスでの測定ができなくなることである。

現状では、複数回で光量を累積すると上記走査変動がデータに入ってくるので精度が低下してくる。

ただ撮像素子の高解像度化や高速化、高感度化は進んでおり、二次元をワンショットで計測できるメリットは大きく今後も発展が期待できる。

4. スリットを用いる方法

スリット方式はビームを複数の方向で断面計測をした後で三次元に合成する方法で医療でのCTやMRIで使用されているトモグラフィックスキャンニング（断面撮影法）を用いている。

当社でもダイナビーム⁽⁴⁾としてビームの走査速度センサを内蔵したタイプの商品化をした（写真2）。



写真2 ダイナビーム

このシステムの問題点としてはアナログ信号からデジタルに変換するA/Dコンバータにシステムの性能が依存することである。

5 GS/秒のA/Dコンバータを用いたが走査速度として実用上は500 m/秒程度であり、1ポイント測定に5方向のスリットを用いることで時間がかかるためスキャン変動、ドリフトも測定値に影響する。

このA/D高速化の問題点を解決する手段としてアナログ信号を2値化してパルスの時間間隔を測定することで高速化を図る試みも報告されている⁽⁴⁾。

スリット法のメリットはレーザー光源がCWで測定できることでレーザーのパルス点灯に関わるエラーを除去できることである。

デメリットはリアルタイム性が低下して走査変動やドリフトに関わる測定ができにくいことである。こちらもA/Dコンバータの高速化やパルス時間計測の高精度化が進んでいるので今後の改善が期待できる。

注：ダイナビームはエーエルティー社の登録商標である。

5. 新しいアプローチ

当社ではその中の新しい選択肢としてラインPINフォトダイオードとラインCCDを組み合わせたハイブリッド構成のスーパーダイナビームを開発した（写真3）。



写真3 スーパーダイナビーム

主走査方向は幅10 μm 、長さ30 mmのPINフォトダイオードを用い副走査方向は4.7 μm ピクセルで30 mmのラインCCDを用い、これらを10 mm間隔で配置した。

センサユニットとして20 mmピッチで最大16個の300 mm幅を2 kHzで連続データの取り込みが可能である。

ただこちらもA/DコンバータやCCDの読み出しクロックの制限で走査周波数がポリゴンスキャナでは4 kHz、光MEMSスキャナでは2 kHzとなっている。

光MEMSスキャナの平面度計測についてはダイナミックに計測するためいくつかの方法が提案されている。

1つは従来の干渉計をストロボ駆動することで光MEMSスキャナのあるタイミングでの平面度を測定しようとするものである。

干渉方式の問題点としては測定波長の1/2を超える場合には測定できなくなるため、位相をシフトすることなどにより補っている。

また短いパルスの光源で測定するので投光パワーと受光感度の関係に工夫が必要となってくる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

またシャックハルトマン型波面センサを用いて測定する試みも報告されている。これはCCDカメラとマイクロレンズアレイで入射波面のスポットフィールドがCCDセンサ上に形成されることによりこのスポットフィールドの変化から平面度を計測する方法である。

ストロボ干渉計との比較で同様の結果が出ることも報告されている⁽⁷⁾。

6. おわりに

ダイナミック ビーム計測はポリゴンスキャナによるLSUと光MEMSスキャナでは仕様が多少異なるものの、高速の走査速度、微小なスポットサイズ、低パワーレーザー出力と要求される測定範囲、測定分解能、リアルタイム性など相反する項目が多い。

当面は限られたスペックで必要な場所で計測されていくと思われるが、新しいアイデアで顧客の要求に答えられるものが開発されるのを期待したい。

<参考文献>

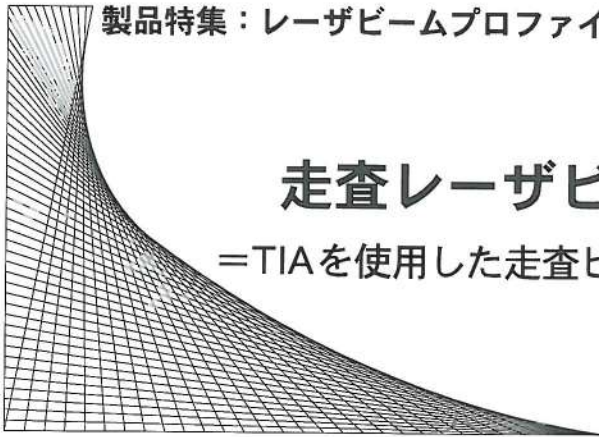
- (1) 吉川浩史・他：動的ビームプロファイル測定技術Ricoh technical report, No.27 (2001)

- (2) 中野哲寿：高性能デジタルカメラ対応型ビームプロファイラ LEPAS-12、光アライアンス、Vol.19, No.1 (2008, 01)
- (3) http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/IST2005_NIP21_Paper.pdf
- (4) 大石篤・他：レーザー画像機器のためのレーザービーム形状計測技術、Konica technical report, Vol.12 (1999)
- (5) 特開 2003-222508
- (6) 特開 2007-240344
- (7) Margaret Brown, et al.: Measurement of the dynamic deformation of a high frequency scanning mirror using a Shack-Hartmann wavefront sensor: Proc. SPIE 4451, Optical Manufacturing and Testing IV, 480 (December 27, 2001)

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役



走査レーザビームの計測

＝TIAを使用した走査ビームの計測と応用＝

エーエルティイー(株) 高野 裕

1. はじめに

走査レーザビームの評価として走査時間計測がある。レーザプリンタでは走査ジッタとも呼ばれ、この特性が悪いと画像で縦ラインが揺らぎ画像品質が劣化する。

この計測には走査ビーム上に2つの光センサを設けてその時間差を連続計測する方法が取られてきた。近年ではレーザプリンタの印字速度が速くなり1ドットに有する時間は数10nsになってきており、この計測には1 ns以下の分解能が求められるとともに、繰返し周波数も数10 kHzくらいまで対応することが必要になってきている。

これらを計測するものとして従来からTIA (Time Interval Analyzer) 又はTDC (Time to Digital Converter) と呼ばれる計測器が用いられてきた。

本稿ではそれらの概要と応用について記載する。

2. TIAの歴史と原理

TIAは当初の用途として質量分析用に開発された。これはノーベル賞を受賞された島津製作所の田中氏の原理にもなっている、加速された荷電粒子の飛行時間を計ることによって対象の質量を測定する分析器である⁽¹⁾。その後レーザプリンタなどの走査ビーム形の情報出力機器の計測に用いられるとともに、時間計測のダイナミックレンジの広さから計測量を変換して測定する用途にも用いられるようになった。これは例えば長さ計測などでは最小分解能に対して測定レンジは3～4桁くらいであるが、時間計測では分解能0.1 nsで

測定レンジ10 msなど9桁くらいのレンジが取れることによる。

1970年代からアジレント(旧ヒューレットパカード)が5371A、5110A、5372Aなどを発売しStanford Research Systems, Inc. SR620などのスタンドアロンタイプの他にGuide Tech GT658PCIなどのPC用のボードとしても発売された。

日本では横河電機が1990年代から参入しTA-320、TA-520、TA-720などを発売した⁽²⁾。これらはほとんどがスタート入力、ストップ入力の2チャンネルでスタートからの時間を基準クロックでカウントし、端数になった部分の時間を端数時間計測回路にて計測する構成になっている。端数時間計測回路は精密な電流原から供給される定電流を漏れ電流の少ないコンデンサに充電して、その電圧をAD変換することにより100 ps以下の分解能で時間計測するように構成されているものが一般的である。

その他にもノギスの原理のように周波数がわずかに異なる2つの周波数の一致をカウンタで検出する方法など色々な方法が提案されている。

近年ではこれらのアナログ方式ではなく、デジタルで構成される方法も提案されており、ヒッグス粒子の発見で注目をあびた加速器による分析のLHCアトラス実験グループではATLAS TDCとして半導体プロセスでの開発が行われてきた⁽³⁾。これは高速のリングカウンタを用いるもので現在では宇宙探査でのLIDARへの応用として受光回路を含めたASICがLIDAR×04としてJAXAで開発されている⁽⁴⁾。

3. 情報出力機器用TIA

レーザープリンタなどの計測では走査ジッタの他に走査の副走査方向の変動も測定する必要がある。これはポリゴンスキャナの面倒れなどの影響によるものであるが、この変位測定を三角スリットなどによる時間に置き換えた場合TIAの入力が2チャンネルでは足りなくなり4チャンネルの入力が必要になる(図1)。

このため当社では4チャンネルのTIAボードALT-9441を2000年に開発した。その後レーザープリンタのカラー化が増えることにより、YMCKの各色でのLSUを持つプリンターシステムでは各走査の同期が必要でさらに多くの入力チャンネルが求められるようになった。また印字速度の高速化から走査するポリゴンスキャナの回転数が上がり、40,000rpm以上になるとポリゴンスキャナも従来のオイル動圧軸受けでは対応できないことが出てきた。この対応としてマルチビームという方法で1回の機械走査で複数のレーザービ

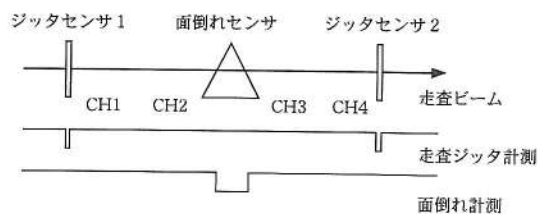


図1

表1 仕様

測定	測定分解能	81 ps
	内部ジッタ	300 ps以下
	測定範囲	30 ns~655 ms
入力	最小パルス幅	30 ns
	最大計測データ数	1,048,576データ
	入力チャンネル数	16ch (最大22ch)
インターフェース	入力	LVDS
	トリガチャンネル	任意チャンネル設定可能
	入力モード	立上りトリガ、立下りトリガ、パルス幅
インターフェース	インターフェース	USB2.0
	USBドライバ対	windows, windows7 (32bit)
その他	ウォームアップ時間	5分以上
	電源電圧	AC100/220 V
	センサ用電源出力	5 V, 200 mA
	外形	W300×D300×H100 mm

ムを走査する方法も開発され、これによってもさらに多くの入力チャンネルが求められるようになった。

これらの要求に対応するため、当社では16チャンネルのTIAユニットALT-9C15を2011年に開発した。ALT-9C15は標準16チャンネル（最大22チャンネル）を有するTIAユニットで連続最大100万データを収集することができる。入力は従来の50オーム系では電流が大きくなるのでLVDS入力を採用し省電力、省スペースを図っている。インターフェースはUSB2.0で収集データを高速でホストに転送することが出来る。

主たるスペックを表1に示す。

4. TIAを用いた計測

4-1 フルカラーLBP

タンデム形のフルカラーレーザープリンタは図2のようにシアン、マゼンタ、イエロー、ブラックに色分けされたLSUが配置されている。各LSUには書き出しのタイミング信号であるBD信号が出力される。走査面には印字サイズに応じた印字幅の左側、中央、右側の走査デテクタセンサが配置されている。

TIA入力としてはLSUごとに4チャンネルの合計16チャンネルが入力され、各ユニットのBD同期精度、走査面でのジッタ、及び走査レンズのfθエラーを含む走査幅を一度に計測することが出来る。

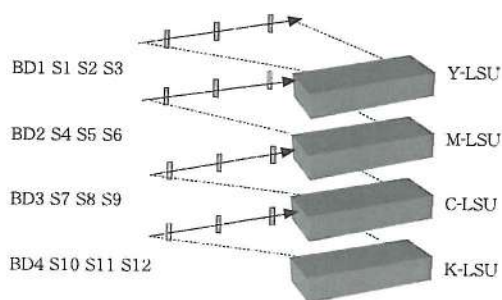


図2

4-2 ポリゴンスキャナの面内ジッタ

ポリゴンスキャナのポリゴンミラーは精密に切削されて面精度が確保されているが、厳密にはミラーの周辺部はダレやハネが生じて複雑な面形状となっている。この面でレーザービームを走査すると走査速度が一定とならず走査ジッタを生じる。

図3のようにセンサを連続的に並べることにより面形状の変化による走査変動を計測することが可能となった。また高回転ポリゴンスキャナでは遠心力によりポリゴンミラーが変形してミラーの面精度が低下することがあるが、この現象もこの計測方法により確認することができる。

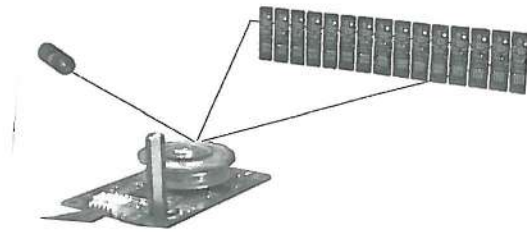


図3

4-3 光MEMSスキャナの走査速度分布

光MEMSスキャナはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の技術で製作された光を走査するデバイスである。

通常は半導体プロセスで製造されるので振動するミラーはシリコンの梁で保持されているため、弾性疲労が無く、機械スキャナであっても長時間の寿命を確保することができる。また構造として共振を利用しているものが多いので省電力が図れるメリットがある。現在商品化されているものとしてはピコプロジェクターやヘッドアップディスプレイがあるが、DMDやLCOSを使用した投影方式に対してフォーカスフリーや画像部分だけ点灯している為省電力という特徴がある。ただディスプレイ用の光MEMSスキャナは二次元走査をするためミラーが水平軸と垂直軸で保持され、それぞれが別に駆動される構造となっている為、共振といっても単純ではなく場合によっては複共振のように動作して走査速度が変動することがある。

図4はセンサを円弧状に19個並べた場合で、走査内での速度分布を連続測定でき、往路での速度分布と復路での速度分布が異なる場合にも対応できる。

また中央、左右2箇所のセンサをウォブルセンサに変えることにより、走査分布とウォブルとを同時に測定することもできる。

4-4 fθレンズのリニアリティー測定

レーザプリンタ用のfθレンズはPMMAで成形製作されるため、条件によっては面精度が悪くなったり、内

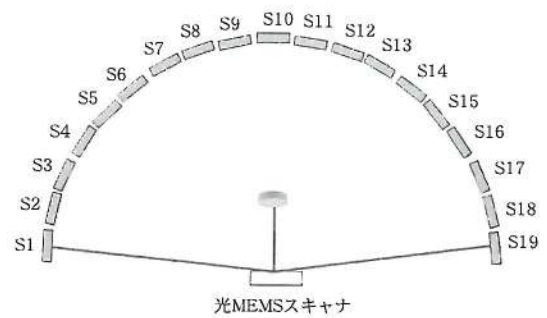


図4

部に脈理が生じてこれによる屈折率の変化からリニアリティーが悪くなったりする。また成形以外にも汚れ、異物の混入、打痕などによってもリニアリティーが悪化するのでできるだけ多くの測定点で測定する必要がある。

図5は21個のセンサを配置した例であるがTIAユニットの入力モードでパルス幅の測定モードがあるので、各センサの時間間隔だけで無くパルス幅を測定することによりビーム径の変化もある程度計測することができる。

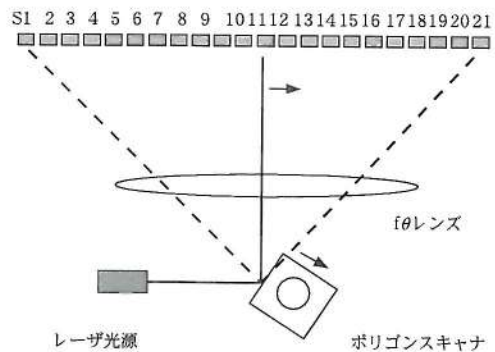


図5

多チャンネルの時間計測では初期のセンサ間隔の設定が問題になることがあるが、これにはジッタが非常に小さい基準ポリゴンスキャナを用いることにより校正することができる。

4-5 ガルバノスキャナのミラー動作計測

ガルバノスキャナはプリント基板用のレーザドリリングに多く使用され、タクト短縮から高速性と高精度を求められている。最近では従来のアナログ角度セン

サから高精度、高安定のデジタル角度センサが用いられるとともに制御回路もデジタル制御になったデジタルガルバノスキャナが注目されている。

ただこの制御も駆動軸の中心に駆動系があり、端部の角度センサとの関係においては非常に精度の良い制御ができていたとしても反対側のミラーホルダーを介したミラーについては制御はされていない。従ってミラーサイズが大きい場合かなりのイナーシャを高速に駆動するため、駆動軸からミラーホルダーまでの軸ねじれ、ミラーホルダーの変形やミラー自身の変形が懸念される。

これらを検証するために図6のようにセンサ信号とエンコーダの複数のデジタル信号をTIAで分析することにより制御性以外の要因を分析することができる。

この場合も光MEMSスキャナと同様にセンサをウォブルセンサに変えることにより動作中のウォブル変化も検出でき、軸の倒れ方向の影響を検証することができる。

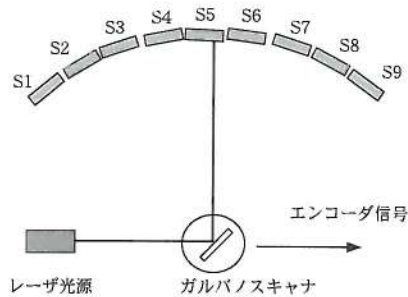


図6

5. おわりに

情報出力機器や製造装置におけるレーザ走査は性能向上やタクト短縮から益々高速、高精度になりつつある。高速性と高精度は場合によってはトレードオフの関係になったり、加工精度や組立精度から製造コストに大きく影響したりすることがある。

これらの解決には要因を分析するために測定することが必要で、当社のTIAユニットALT-9C15がその一端を担えれば幸いである。

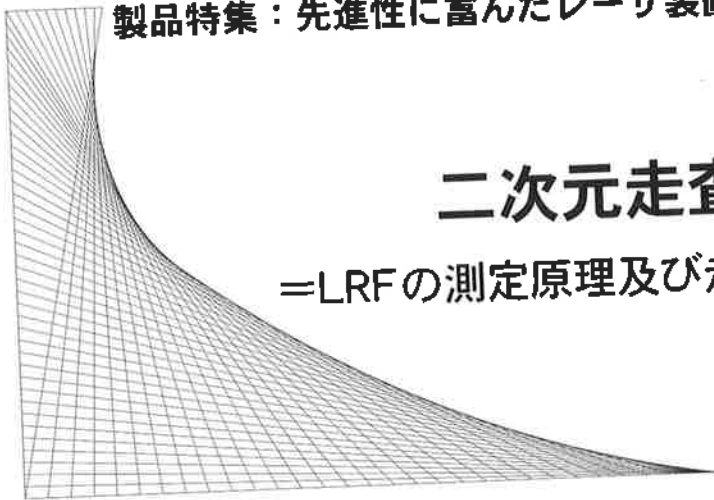
＜参考文献＞

- (1) 藤島津製作所web
<http://www.anshimadzuco.jp/ms/axima/princpl1.htm>
- (2) 横河技報：Vol.14, No.1 (1997)
- (3) ATLAS TDC web <http://atlas.keek.jp/tdc/>
- (4) Development of a ROIC for LIDAR on planetary lander by CMOS technology, 水野他：Laser Radar Technology and Applications XVII Edited by Turner, Monte D.; Kamerman, Gary W. Proceedings of the SPIE, Vol.8379, pp.837910-837910-7 (2012)

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL：03-5946-7336 FAX：03-5946-7316
E-mail：htakano@alt.co.jp



二次元走査型LRF

＝LRFの測定原理及び走査光学系の方式＝

エーエルティー(株) 河村 達也

1. はじめに

LRF (Laser Range Finder) とはレーザ光を用いた測距装置のことである。同様に距離を測定するものにLIDAR (Light Detection And Ranging) があるが概ね計測レンジが100 m以下の近距離用をLRF、それ以上の遠距離用はLIDARと呼ばれている。

LRF単体では奥行き方向の一次元情報のみであるが、ポリゴンスキャナやガルバノスキャナ、光MEMS等の光走査装置と組み合わせることで広範囲を高速に三次元計測可能である。

近年、これらの装置はロボットや無人搬送車のような自立移動体の視覚センサとしてや自動車の衝突防止装置、進入監視などのセキュリティーシステム等、様々な分野に応用されている。本稿ではLRF (LIDAR) について測定原理及び二次元走査する際の走査光学系、光偏向器について述べる。

2. 測定方式

LRFの代表的な測定方式としては、TOF方式、AM変調方式、FM-CW方式の3種類がある。以下に各々の原理、特徴について説明する。

2-1 TOF (Time Of Flight) 方式

パルス発光させたレーザ光を対象物に照射し、反射して戻ってくるまでの飛行時間から距離を求める手法である。対象物までの距離 L は、光速を c 、レーザ光を発射し戻ってくるまでの飛行時間を Δt とすると式(1)で表される。

$$L = \frac{c\Delta t}{2} \quad \dots(1)$$

L : 対象物までの距離 (m)

c : 光速 (3×10^8) (m/s)

Δt : 飛行時間 (s)

TOF方式の特徴としては、パルス幅の短いレーザ光を測定に使用しているため安全規格IEC 60825-1で定められているクラス1を超えない範囲においても、1パルス当りの発光強度を高くすることができるためより長距離の計測が可能となっている。クラス1とは人体に影響を与えない低出力なもので目に安全であり、どのような条件下でも最大許容露出光量 (MPE) を超えないレベルのことである。

しかしながら計測ポイントは信号の立上がり部分にしかなく、ごく短い時間を測定しなければならない。このため測定精度は広帯域アンプ、演算回路の速度、精度に大きく依存し、より高精度な距離測定を行うには高価な部材が必要となってくる。

仮にサンプリング周波数が1 GHzの場合、サンプリング時間は1 nsとなり、この間に光は往復で300 mm移動するのでこのときの分解能は150 mmとなる。逆に分解能10 mmとした場合、サンプリング速度は15 GSPS必要となり技術的にも難しくなる。1パルス当りの発光強度を高くできる点や測定分解能の点からより長距離での使用に有利な方式と言える。

2-2 AM変調 (Amplitude Modulation) 方式

正弦波状の強度変調をかけたCWレーザ光を対象物に照射し、反射して戻ってきた光と参照光との位相差から距離を求める手法である。AM変調方式での対象物までの距離 L は、位相差を $\Delta\phi$ 、変調周波数を f とする

と式(2)で表される。

$$L = \frac{c\Delta\phi}{4\pi f} \quad \dots(2)$$

- L : 対象物までの距離 (m)
- c : 光速 (3×10^8) (m/s)
- $\Delta\phi$: 位相差 (°)
- f : 変調周波数 (Hz)

式(2)より変調周波数 f を上げることにより距離変化 ΔL に対する位相差 $\Delta\phi$ が大きくなり測定精度が向上することが分かる。

AM変調方式ではTOF方式と比べ低いサンプリング周波数を用いて高精度な測定ができるため比較的安価な部品で構成できる。また計測ポイントを多く取れるため計測点数を N とすると \sqrt{N} 倍で S/N を向上させることができる。

1種類の変調周波数を用いた場合、位相遅れが変調周波数の1周期を越えると前の周期と判別不能となり正確な距離が測定できなくなるため、距離と精度を両立させるために2種類以上の周波数を用いる。1周期を越え位相差 $\Delta\phi$ が0となるのは対象物までの距離 L が $c/2f$ の倍数になったときである。仮に変調周波数を100 MHzとすると位相差が0となり計測不能となる距離 L は1.5 mとなる。また変調周波数を3 MHzとすると計測不能となる距離 L は50 mである。変調周波数としてこの2つの周波数を組み合わせることで計測不能となる距離はそれらの最小公倍数となり、この場合150 mまで計測距離を伸ばすことが可能となり測定精度は周波数の高い100 MHzの信号により決定される。

2-3 FM-CW (frequency-Modulated Continuous Wave) 方式

のこぎり波状の周波数変調をかけたCWレーザ光を対象物に照射し、参照光と反射光の周波数差(ビート周波数)から距離を求める手法である。図1は参照光を基準にしたとき、遅れ時間 $2L/c$ で干渉した反射光と参照光の関係である。

FM-CW方式での対象物までの距離 L は、変調周期を T 、ビート周波数を f_b 、周波数掃引幅を Δf とすると式(3)で表される。

$$L = \frac{cTf_b}{2\Delta f} \quad \dots(3)$$

- L : 対象物までの距離 (m)
- c : 光速 (3×10^8) (m/s)
- T : 変調周期 (s)
- f_b : ビート周波数 (Hz)
- Δf : 周波数掃引幅 (Hz)

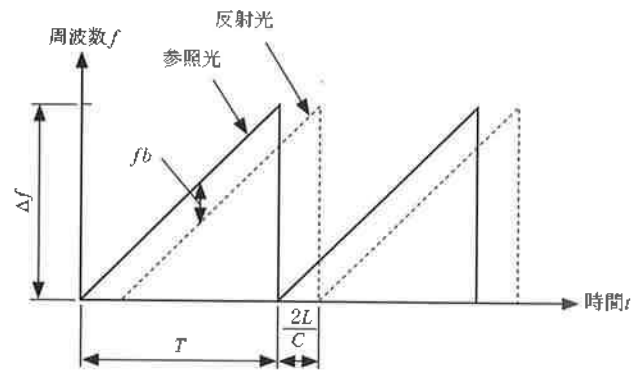


図1 FM-CW法における参照光と反射光の関係

FM-CW方式は測長パラメータに周波数値を利用することで外乱ノイズの影響を受けにくいという特徴があり、計測に必要な受光レベルを抑えられ、反射率の低い対象物でも高精度な測長が可能である⁽¹⁾。

3. 走査光学系方式

LRFの実際の応用に関しては1方向のみの距離測定だけではなく空間を三次元的に捉え、より高次の情報を得る要求が多くなっている。三次元的に捉えるためにはレーザ光を二次元走査する必要があり、また走査方向に視野を持ち受光素子に光を導かなくてはならない。走査型LRFの光学系としては大きく分けて下記3つの方式がある。

3-1 投受光同軸走査

投光軸と受光軸をビームスプリッターなどで同軸とし、1つの光偏光器で走査する方式である。同軸にする方法はこのほかにもカセグレン光学系の副鏡位置に小型ミラーを置き同軸にする方法や、受光レンズ前に投光光学系を直接設置する方法などがある。

メリットとしては投受光方向が常に一致しているため、ビームサイズに合わせ視野を絞ることができ、受光素子に入射する外乱光を最小限に抑えることが可能である。

3-2 投受光非同軸走査

投光軸と受光軸を独立した光偏光器で走査する方式である。同軸走査では受光光学系の前にミラー等を設置するため受光光量に損失があった。非同軸ではその損失はなく同じ受光光量とした場合、受光口径を小さくでき、光偏光器のミラーもより高速に動作できる。

しかし、投受光視野を一致させるためには双方の光偏光器を高精度に同期させ駆動させる必要があり要求仕様によっては難しい場合もある。

3-3 投光走査、受光固定

投光側のみ走査し受光側は固定の光学系で構成された方式である。受光光学系は投光側走査範囲と同等の視野を持ち対象物からの反射光を受光素子に集光する。受光素子としては逆バイアスを印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のAPD (Avalanche Photodiode) がよく使われる。より高速な応答が必要であるため受光面サイズは大きくはとれず $\phi 0.5$ mm程度のもを使用することが多い。このような受光面が小さい素子1つに対して視野範囲を大きくとることは難しく、狭視野の光学系を扇形に配置し視野範囲を確保する方法や広視野の光学系にAPDアレイを使用する方法などがある。他の方式と比べ常に光学系は広い視野を持つため外乱光の影響を大きく受けるが、投光走査角度に合わせAPDのチャンネルを切替えることで対応している。また、外乱光の影響を減らすために通常BPF (Band Pass Filter) が用いられるが、受光固定式の場合、反射光は垂直入射だけではなく投光走査角度に応じた角度でBPFに入射する。BPFは入射角度に応じて透過波長帯が短波長側にシフトするため、狭帯域のBPFが設定できなく外乱光の影響を受けやすくなる。この方式のメリットとしては光偏光器のミラーサイズに依存せず受光口径を比較的大きく取れる点があげられる。

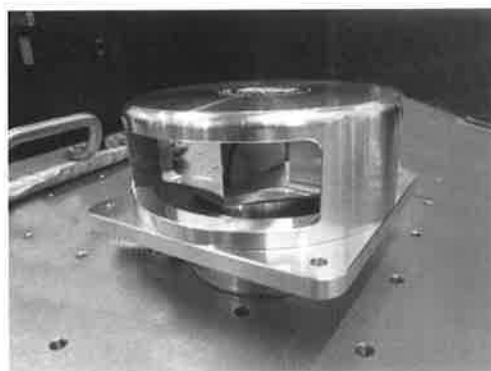


写真1 ポリゴンスキャナ



写真2 傾斜ポリゴン
傾斜角度が各々異なる6面ポリゴンミラー

4. 光偏光器

ミラーを使用した光偏光器として代表的なものにはポリゴンスキャナ、ガルバノメータスキャナ、光MEMSスキャナがある。以下にこれら光偏光器の特徴について説明する。

4-1 ポリゴンスキャナ

ポリゴンスキャナは多面鏡を連続的に回転させ光を走査する光偏光器である。

ミラー面数を増やし回転数を上げることで走査周波数は大きくなるが、最大偏光角は小さくなる。一定速度の高速走査に適しているため二次元のラスタースキャナを行う場合は高速軸にポリゴンスキャナを使用し、低速軸をガルバノメータスキャナにする場合が多い。

走査範囲をより広くするためにモノゴン (1面鏡) を使用する場合もある。モノゴンの場合はレーザ光をミラーの回転軸方向 (垂直方向) から入れ水平方向に走査するため原理的には 360° 走査可能である。

また多面多角度の傾斜ポリゴンを使用することで擬似的に二次元走査を行う方式もある。但しこの場合、走査線の数はミラー面数に限られる。

4-2 ガルバノメータスキャナ

可動コイルの軸にミラーを取付けた構造となっている。この磁界中にある可動コイルに電流を流すことで電磁力を発生させ、電流に応じたトルクが得られることを利用しミラーの回転角度を制御している。非共振型であるため数Hzといった低速走査も可能で、正弦波以外の信号で駆動させたり任意の位置に停止させたりすることもできる。

二次元走査を行う場合は通常2軸を使用しなければならず装置が大きくなるという欠点があるが、近年では1枚のミラーに2軸を設けたコンパクトな非共振型の二次元走査型アクチュエータの開発も行われている²⁾。

4-3 光MEMSスキャナ

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術で製作された光偏光器である。通常は半導体プロセスで製造され、単結晶シリコンからエッチングによりミラー、トーションバー、保持枠を一体加工しているため、弾性疲労がなく機械スキャナであっても長時間の寿命を確保することができる。また構造として共振を利用しているものが多いので省電力が図れるメリット

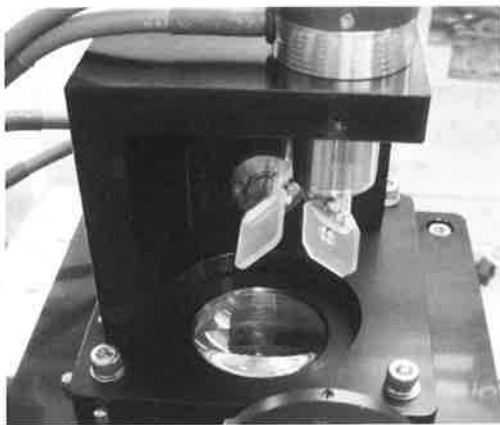


写真3 ガルバノスキャナ

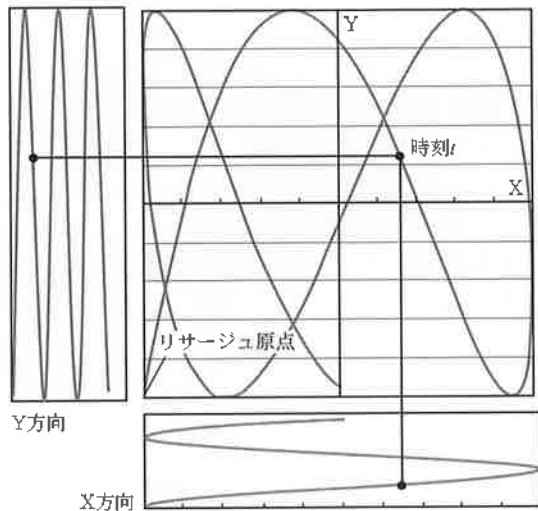


図2 ECOSCANの走査位置⁽⁴⁾

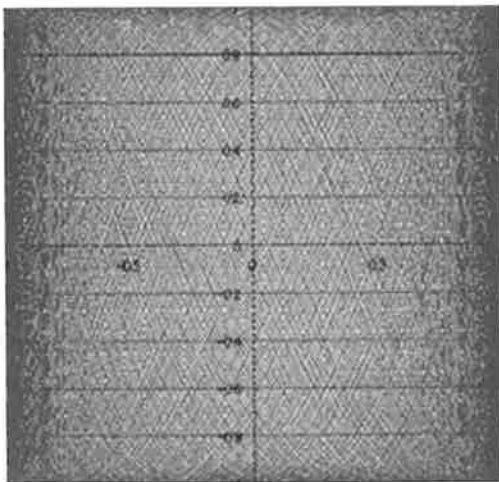


図3 リサーチ走査の軌跡⁽⁴⁾

がある⁽³⁾。駆動方式としては電磁型、静電型、 piezo型がある。それぞれの方式において二次元タイプも開発されており小型軽量化に貢献している。二次元走査を2軸共に共振型スキャナを用いる場合、水平方向と垂直方向の共振周波数を変えることで図2、図3のようなりサーチ走査を行い各走査角における距離計測を実現している⁽⁴⁾。

5. おわりに

本稿ではLRF (LIDAR) について測定原理及び二次元走査する際の走査方式、光偏光器について説明した。現在では様々な分野でLRF装置が使用されまた活躍しているが、今後、光MEMSのような新しいデバイスと共に益々計測技術が発展することを期待したい。

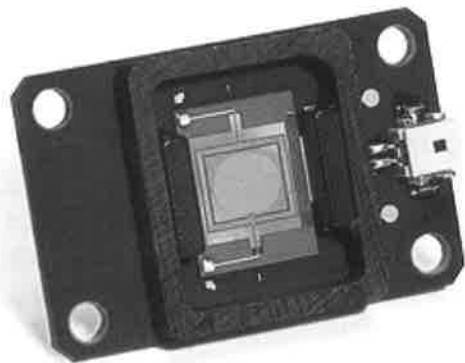


写真4 光MEMSスキャナ⁽⁴⁾

〈参考文献〉

- (1) 石岡昌人・栗林志頭真：反射ターゲットを用いない高精度レーザ測長技術、三菱重工技報、Vol.38、No.5、274 (2001)
- (2) 山田真人・山口光隆・前納良昭・市浦秀一：非共振型二次元光走査用アクチュエータの開発、電子情報通信学会、C-5-2 (2010)
- (3) 高野裕：光MEMSスキャナの計測、生産化に向けて生産工程でのアプローチ、光アライアンス、Vol.23、No.1、50 (2012.1)
- (4) ECOSCAN、距離画像センサ、<http://www.ecoscan.jp>、日本信号㈱

【筆者紹介】

河村達也

エーエルティー㈱ 開発部
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL: 03-5946-7336 FAX: 03-5946-7316
E-mail: tkawamura@alt.co.jp

光MEMSスキャナの計測

＝量産化に向けて生産工程でのアプローチを解説＝

エーエルティ㈱ 高野 裕

1. はじめに

光MEMSスキャナはMEMS (Micro Electro Mechanical System) の技術で製作された光を走査するデバイスである。通常は半導体プロセスで製造されるので振動するミラーはシリコンの梁で保持されている為、弾性疲労が無く、機械スキャナであっても長時間の寿命を確保することができる。また構造として共振を利用しているものが多いので省電力が図れるメリットがある。

現在商品化されているものとしてはピコプロジェクターがあるが、こちらについては光MEMSスキャナによるスキャン方式の他にDMDやLCOSを使用したプロジェクション方式もある。後者については画像面を投射するのでフォーカス調整が必要であるし、画像に関わらず光源は点灯しているので省電力化が図りづらい。

また光源としてはLEDとレーザーがあるがLEDは発光面積が大きく、放射角が大きいので効率が悪くなり、発光波長からの色再現性も劣る。従って、小型化、省電力、色再現性ではレーザーのスキャン方式が優れているが、画像品質としてはスペckルノイズを低減するなどの工夫も必要となってくる。

本稿ではこれらに使用される光MEMSスキャナの量産に向けた計測方法について述べる。

2. 光MEMSスキャナの種類と特性

光MEMSスキャナは現在色々な方式が提案されているので、その構造と特性について述べる。

2-1 電磁タイプムービングコイル形

多くのメーカーが採用している一般的な方法で、磁石で構成される静磁界の中に可動コイルを配置した構造になっている。

半導体プロセスで製造されたミラーにはコイルが形成され、細い梁で磁界の中に配置される。代表的な特性としては周波数500～8 kHz、振り角10度～70度(光学角)が得られ設計自由度が高い。主に共振構造で振幅をとる方法で、入力正弦波又は矩形波であるが、直流入力のDCタイプも振幅は小さいものの光スイッチなどに応用されている。一次元タイプのほかに二次元タイプも可能で、二次元タイプについてはメーカーにより磁気回路の構成が異なる。

2-2 電磁タイプムービングマグネット形

ムービングコイルとは逆にマグネットを動かすタイプで、構造が単純であり従来から用いられたレゾナントスキャナにも同様の方式を採用しているメーカーがある。マグネットを動作させるのでそのイナーシャから高速動作は難しいが、シンプルな構造から量産時のコストが下げられるメリットがある。

2-3 静電形

静電吸引、反発力を利用したMEMSスキャナで通常は面積を稼ぐ為に楕形電極構造を用いておりMEMS本来の微細構造技術が発揮される。高い電圧が必要であるがインピーダンスが大きいので電力としては小さく、最近では50 V以下でのドライブも可能である。微細構造であるためオープンタイプでは埃などの影響を受ける為、気密パッケージされる場合が多い。

2-4 ピエゾ形

圧電材料に電圧を印加した場合の変形を利用するMEMSスキャナで色々なタイプが提案されている。一

つの素子を使用するだけでなく複数の素子を使用し異なる印加電圧を加えて、高速、大振幅を得る工夫をされているものも開発されている。量産で低コストが見込まれるが静電タイプと同様に高い電圧が必要である。電磁タイプについては磁気回路が必要なことと、静電型でも対向電極が必要でウェーハレベルでの検査においてピエゾ方式は素子で完結しているの、検査がしやすいメリットがある。

また駆動方式によらないが、プロジェクター用途では副走査（低速側）の共振は使いにくいので非共振とするものが開発されている。ただこれらも共振周波数は存在するので製品設計には注意が必要である。

3. 光MEMSスキャナの計測

光MEMSスキャナによるレーザスキャンはテレビジョンのようなラスタースキャンの他に、両方の共振を使用したリサージュのようなスキャンがある。いずれの方式にしてもスキャン出力が歪み無く、均一にスキャンでき何時も同じ場所にスキャンすることが必要であるのでこれに対するの評価が必要になる。

3-1 ジッタ

主走査方向（高速側）については走査毎に走査速度が異なると出力の歪となる。このパラメータがジッタで通常走査幅での時間の変動をパーセントで表す。測定方法としては走査内に2つのレーザ検出センサを設けてその時間を連続計測する。高速の検出センサと100 ps以下の分解能を持つ時間計測システムが必要である。

3-2 ウォブル

副走査方向（低速側）について走査ごとに走査位置が異なると出力の歪となる。このパラメータがウォブルで通常一定回数の走査内での副走査方向の変動の最大値とその中の最大偏差をP-P及び隣接として評価する。光MEMSスキャナの場合には走査位置によって変動することがあるので、走査域内で複数の位置で確認する必要がある。

3-3 最大振り角

スキャナとして最大の走査角度は重要なパラメータである。ただ共振形では最大振り角は走査の折り返し点でもあり、走査速度はゼロとなる。副共振が加わると最大振り角も変動することがあるので正確に最大振り角を位置として測定するのは難しい場合がある。

共振での位置は通常正弦波形となっているので角度の分かっている2点間の時間を計測することにより、最大振り角を時間換算で算出する方法もとられている。

3-4 共振周波数

最大振り角は共振点で得られるのと、通常同一ロット内であっても共振周波数がばらつくため、個別に共振周波数の測定が必要である。

測定開始周波数とステップ周波数、ステップ時間と周波数の変化方向のパラメータで測定する。いかに短い時間内で共振周波数を測定するにはデバイスの特性を把握しておく必要があり、デバイスによっては非線形の共振を使用しているものもあるので注意が必要である。

4. ウェーハレベルでの計測

光MEMSスキャナは通常半導体プロセスで製作されるため、製品規格に適合しないものはできるだけ源流で検査する必要がある。その要求からウェーハレベルでの検査が必要になってくるが集積度が高いのでセンサ類の配置に制限があり難しい検査となっている。

光MEMSスキャナの検査には色々な方法があるが実画像から評価する方法が提案されている。図1はフラウンフォーファー（ENAS）のHendrik Spectなどによって提案されている方法で¹⁾原画像データと投影画像データを比較して色々な投射パターンから各パラメータを検査しようというものである。これをウェーハ検査に適用するものが図2である。

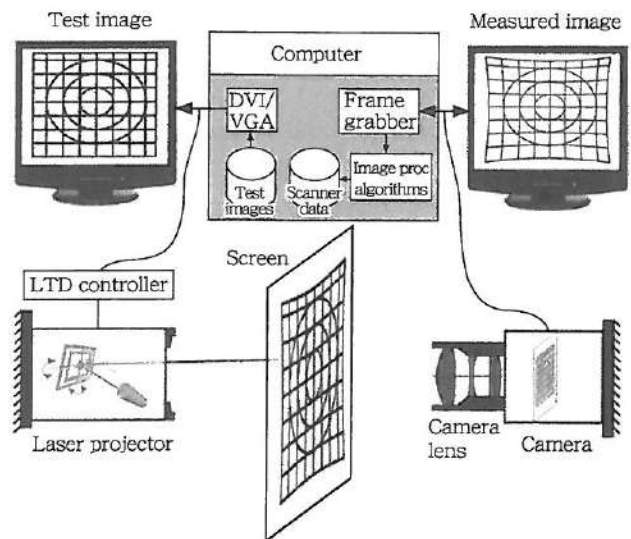


図1

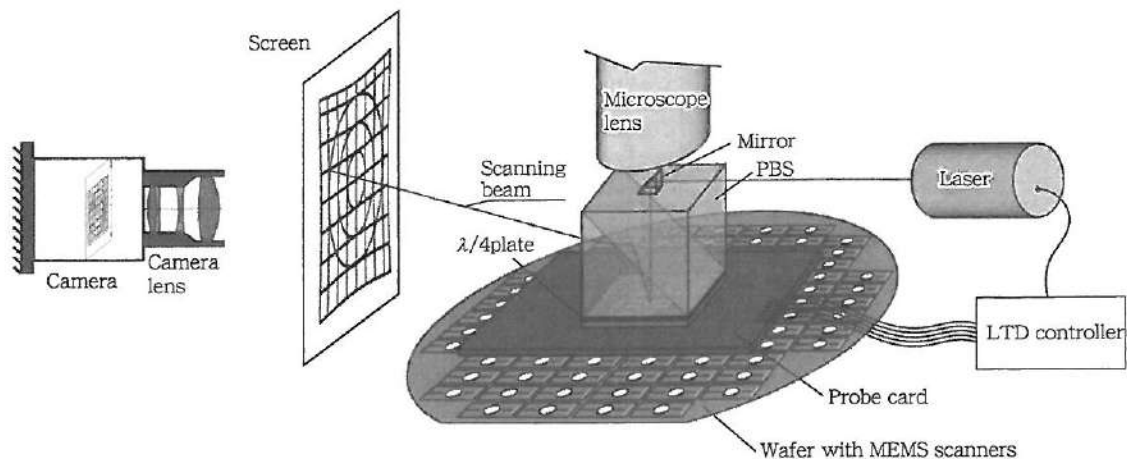


図2

5. デバイス単体での計測

デバイス単体では光MEMSスキャナ用の検査システムを使用することができる。

エーエルティー㈱のモデルALT-9A44⁽²⁾ (写真1) は各パラメータを測定するとともに、オプションとして共振パラメータである圧力、温度を変えられるチャンパーや耐久試験にも対応している。タクトタイム10秒以下も可能で、インラインでの検査も可能である。主な仕様は以下である。

＜基本計測方式＞

ウォブル：3角スリット時間変化検出方式

ジッタ：2点間タイムインターバル検出方式

＜測定対象＞

対象品種：1軸MEMS (2軸MEMSオプション対応)

光学振り角：±15°以上 (オプションで微小角対応可)

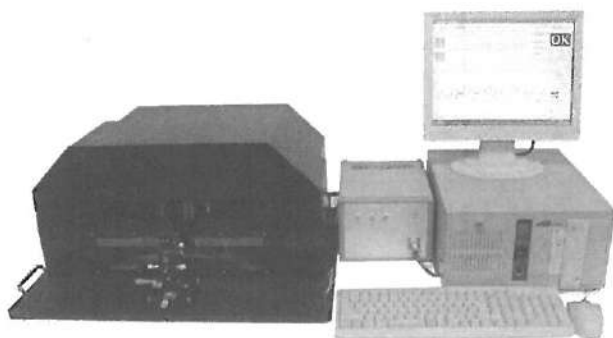


写真1

ミラーサイズ：1.2×1.2 mm以上

駆動周波数：60～30 kHz (オプションで30 kHz以上対応可)

測定用光源：670 nm、2 mW

＜測定項目＞

ジッタ：測定分解能 0.1 ns

ウォブル：測定分解能 1 μm

最大振り角：測定分解能 0.1 ns

共振周波数：測定分解能 0.1 ns

測定温度：測定分解能 0.1 °C

6. アプリケーションでの計測

デバイス単体で良品でもアプリケーションに組み込むことによって特性が変化することがある。

例えばオープン型の光MEMSスキャナでは空気が負荷となっている為、スキャナを狭い空間に設置すると空気の負荷量が増加して共振特性が変化してしまう。

従って製品検査には光MEMSスキャナの特性を考慮した計測が必要となってくる。

応用製品としてはピコプロジェクター、ヘッドアップディスプレイ、バーチャルキーボードなどの投射ディスプレイが期待されている。

近年これらはスマートレーザディスプレイと呼ばれることもあり、小型省電力から携帯電話、ポケットパソコン、ノートパソコン、デジタルカメラ、デジタルビデオ、携帯メディアプレーヤ、ゲーム機などへの搭載も検討され、2023年には23兆円の新たなマーケットが予想されている⁽³⁾。

これらについては投射パターンや投射ビーム特性を計

測することで画像の劣化要因を計測することができる。

ヘッドマウントディスプレイやRIDと呼ばれる網膜走査ディスプレイや眼科検査システムは直接網膜に画像を形成するので計測方法に注意が必要である。

また距離、エリアセンサでの応用も研究されているがこちらは赤外レーザでレーザもパルス駆動や高周波変調されることが多いので計測方法に工夫が必要である。

さらに受光回路への迷光など他のシステムに無い考慮が必要である。

7. おわりに

光MEMSスキャナは日本の将来技術のなかでも重要な技術と考えられる。

従来から築かれてきた微細加工技術とともにその応用技術はこれから世界の中で日本の担う役割にも関連し、益々の発展を期待したい。

当社でも“明日を拓く、光MEMSスキャナ”の専用サイトを立ち上げ⁽⁴⁾情報の提供を行っており、デバイスメーカー、アプリケーションメーカー、ユーザー間の橋渡しができればと考えている。

＜参考文献＞

- (1) Image based test methodology for laser display scanners The Smart Systems Integration conference in 2010
- (2) 光MEMSスキャナ評価、検査システムALT-9A44紹介ウェブサイト。
<http://www.alt.co.jp/pdf/alt9a44.pdf>
- (3) スマートレーザディスプレイ動向調査報告書2011年版、レーザ学会、レーザディスプレイ技術専門委員会（オプトロニクス社）
- (4) 明日を拓く光MEMSスキャナ、ウェブサイト：
<http://www.alt.jp/>

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役

〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10

TEL : 03-5946-7336 FAX : 03-5946-7316

計測技術

定価：2,000円/年間購読料：20,000円（14冊・増刊2冊含）

本誌は、工業計測の各分野について、①基礎計測-物理・化学量等基礎的諸量の計測と分析。②計測要素-回路、装置、精密機器。③プロセス計装-計画、管理、プロセス制御。④自動化機器-サーボ技術、NC、マテリアルハンドリング、自動倉庫。⑤情報処理-データ処理、電子計算機及びその応用。以上5本の柱を編集の基本にし基礎理論から事例など実務応用面に至る諸問題をとりあげております。

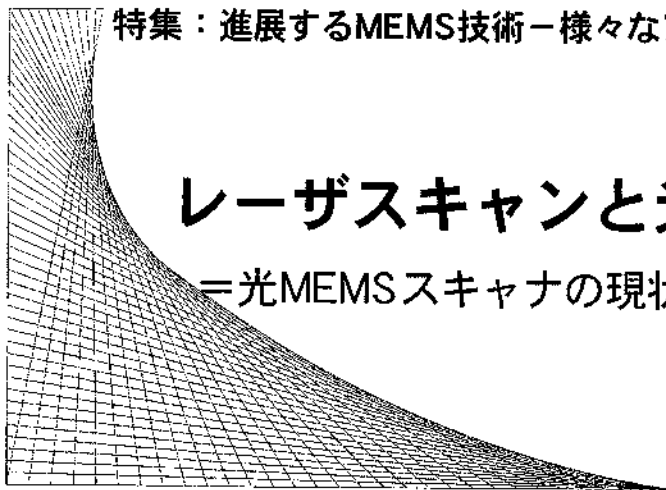
年間購読のお申し込みは **フリーコール 0120-974-250**

<http://www.nikko-pb.co.jp/>

日本工業出版株 販売課

本 社 〒113-8610 東京都文京区本駒込6-3-26 TEL. 03 (3944) 8001 FAX. 03 (3944) 6826

E-mail:sale@nikko-pb.co.jp



レーザスキャンと光MEMSスキャナ

＝光MEMSスキャナの現状と応用分野及び計測＝

エーエルティイ(株) 高野 裕

1. はじめに

光MEMSスキャナはMEMS (Micro Electro Mechanical System) の技術で製作された光を走査するデバイスである。MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical System) と呼ばれることもあり、近年実用化が進んでいる。大きな分類ではプロジェクターで使用されているDMD (Digital Micromirror Device) も含まれるが、こちらは画素数分の小さいミラーを画像信号によって選択動作させているのでデジタルMEMSと呼ばれることもある。これに対して1枚ミラーを一次元または二次元に振らせるものがアナログミラーと呼ばれるが、本稿ではこのデバイスを対象とする。従来この用途としてはレーザプリンタに代表されるようなポリゴンスキャナと呼ばれる、多面体ミラーをモータで回転するタイプとレーザメーカーなどに使用されているガルバノスキャナと呼ばれる1面ミラーを電磁力で回転制御するタイプが主であった。これらの回転軸受けは低速ではボールベアリングが使用されており回転累積時間による寿命が発生する。高速ではオイル動圧軸受や空気動圧軸受が使用されているがこちらについても起動、停止回数で寿命が生じる。また高速では騒音が発生したり、消費電力が大きいなどのデメリットがある。

これに対して光MEMSスキャナは小形、軽量でシリコンによって製造されるものについては、梁の弾性疲労が無く、機械スキャナであっても長時間の寿命を確保することができる。

また構造として共振を利用しているものが多いので省電力が図れるメリットがある。

2. 光MEMSスキャナの種類と特性

光MEMSスキャナは現在色々な方式が提案されているので、その構造と特性について述べる。

(1) 電磁タイプ：ムービングコイル形

多くのメーカーが採用している一般的な方法で、磁石で構成される静磁界の中に可動コイルを配置した構造になっている。半導体プロセスで製造されたミラーにはコイルが形成され、細い梁で磁石側と接続される。

代表的な特性としては周波数500～8 kHz、振り角10度～70度(光学角)が得られ設計自由度が高い。

主に共振構造で振幅をとる方法で入力には正弦波又は矩形波であるが、直流入力のDCタイプも振幅は小さいものの光スイッチなどに応用されている。

一次元タイプのほかに二次元タイプも可能で、二次元タイプについてはメーカーにより磁気回路の構成が異なる。

製造メーカーとしては日本信号株式会社^①でエコスキャンの名称で標準品が販売されている。開発メーカーとしてはオリンパス光学工業が自社のレーザ顕微鏡に搭載していたり、米国マイクロビジョン社^②ではピコプロジェクターに採用されている。

またマイクロプレジジョン株式会社^③でもディスプレイ用を開発している。

(2) 電磁タイプ：ムービングマグネット形

ムービングコイルとは逆にマグネットを動かすタイプで、構造が単純であり従来から用いられたレゾナントスキャナにも同様の方式を採用しているメーカーがある。マグネットを動作させるのでそのイナーシャから高速動作は難しいが、シンプルな構造から量産時のコストが

下げられるメリットがある。製造メーカーとしては米国テキサスインスツルメンツ社⁽⁴⁾があり、開発メーカーとしてはアンリツが自社の光計測器に採用している。

(3) 静電形

静電吸引、反発力を利用したMEMSスキャナで通常は面積を稼ぐために楕円電極構造を用いておりMEMS本来の微細構造技術が発揮される。高い電圧が必要であるがインピーダンスが大きいので電力としては小さく、最近では50 V以下でのドライブも可能である。微細構造であるためオープンタイプでは埃などの影響を受けるため、気密パッケージされる場合が多い。

製造メーカーとしては台湾のオーパス マイクロシステム社⁽⁵⁾や独国 フラウンホーファー社⁽⁶⁾がある。

開発メーカーとしては住友精密、パナソニック電工があり二次元タイプも開発されている。

(4) ピエゾ形

圧電材料に電圧を印加した場合の変形を利用するMEMSスキャナで色々なタイプが提案されている。一つの素子を使用するだけでなく複数の素子を使用し異なる印加電圧を加えて、高速、大振幅を得る工夫をされているものも開発されている。量産で低コストが見込まれるが静電タイプと同様に高い電圧が必要である。

開発メーカーとしてはスタンレー電気、オムロン、ミツミ電機、ブラザー工業がある。

(5) ピエゾ形：ラム波共鳴駆動形

本年2月産業技術総合研究所からピエゾタイプの新しい光MEMSスキャナが発表され、2月の「国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 nano tech 2010」に展示された⁽⁷⁾。

この光MEMSスキャナの特徴は高速でも非常に大きな振り角を得ることができる、ラム波共鳴という新しい方法を採用している。

25 kHzで光学角90度という従来の5～10倍の振り角が得られ、構造もメタルベースで量産時のコストダウンも期待でき、圧電膜の形成には産業技術総合研究所のエアロゾルデポジション法が用いられている。

3. 光MEMSスキャナの応用

3-1 レーザプリンタ

近年、家庭用でも普及してきたレーザープリンタはデジタル複写機と合わせて年間2,000万台以上の大きなマーケットがあるためポリゴンスキャナの置き換えとして検討されてきた。2007年には米国レックスマークから光MEMSスキャナを搭載した初めてのレーザープリンタが販売されたが、こちらにはテキサスインスツルメンツのム

ービングマグネット形が採用された(写真1)。特にローエンド機種ではコストダウンからポリゴンスキャナに代わるスキャナが要求されているが、光MEMSスキャナの場合には振幅安定性の制御システム、往復走査に対する画像エンジンなどスキャナ単体だけでなく周辺を含めたコスト評価が必要である。小型、省電力、低騒音のメリットからポリゴンスキャナに置き換わって行く機種が出てくると予想される。

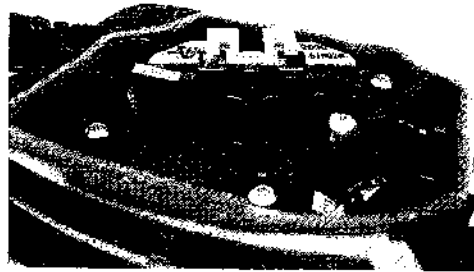


写真1 レーザプリントに搭載された光MEMSスキャナ

3-2 プロジェクター

(1) ピコプロジェクター

本年発売されたマクロビジョンのshowWXはレーザースキャン方式としての初の超小型プロジェクターである。14×60×118 mm、122グラムの形状からWVGAの解像度で150 mm距離において6インチ、2.5 m距離で200インチの画像をフォーカスフリーで得ることができる(写真2)。現在DMDやLCOSを使用した小型プロジェクターが市販されているが、これらはフォーカス調整が必要である。オーパスマイクロシステムからも昨年フルカラーのレーザースキャン方式のプロジェクターエンジンの発表があった。ピコプロジェクターはプロジェクター単体としての使用だけでなく、昨年にはサムスンからDMD方式ではあるが携帯電話に内蔵されているタイプが発売されたり、ニコンからはLCOSタイプではあるがデジタルカメラに内蔵されているものが発売されている。

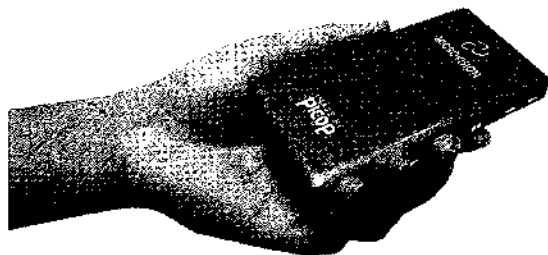


写真2 ピコプロジェクター (マイクロビジョンご提供)

これらは従来のディスプレイの形状制限を取り払うものであり、ラップトップコンピュータのポケット化を含み、色々な分野に展開されていくものと思われる。超小型プロジェクターの世界マーケットは2009年に50億円の規模が2015年には1,500億円の市場に拡大すると見込まれている。

(2) ヘッドマウントディスプレイ

ヘッドマウントディスプレイは頭部に装着するディスプレイの総称であり、軍需用途で一部用いられてきたが、昨年ブラザー工業から網膜走査形のメガネタイプのヘッドマウントディスプレイが発表された。こちらはピエゾ形の二次元高速スキャナと電磁形の低速スキャナを組み合わせた二次元スキャンでレーザ光を直接網膜に照射する⁹⁾。

従来のディスプレイにない、他人からはデータが見えない、頭を動かしてもディスプレイが同視野で見えるなどの特徴から、セキュリティ、メディカル、工業用途への応用が期待されている。

(3) ヘッドアップディスプレイ

ヘッドアップディスプレイは視野の前面に情報を映し出すディスプレイでこちらも戦闘機などで古くから用いられてきた。車載用では現状液晶タイプなどで走行速度や進行方向を表示するものがオプションとして設定されているが、これからは視界の悪い場合の路肩表示やカーナビゲーション、歩行者や道路状況の表示など多くの表示を見やすく表示することが求められている。

車載用は環境が厳しくどの方式が主流になっていくか、これからの課題である。

(4) 画像モニタ

CRTディスプレイが無くなりLCDかプラズマになると、色調再現性で問題が出てきている。これはLCDのカラースタビライザにしてもプラズマの発光スペクトルにしても従来の蛍光スペクトルより劣るため、従来のCRTディスプレイ相当の色調再現性のあるディスプレイが求められている。

産業技術総合研究所とマイクロプレジジョンでは単色レーザ3本を用いて、産業技術総合研究所のピエゾタイプ高速二次元スキャナとマイクロプレジジョンの電磁タイプ低速二次元スキャナを組み合わせることで、各レーザをRGB蛍光体に照射することによる新しいタイプの画像モニタの開発も行っている¹⁰⁾。

3-3 センシング

(1) レーザ顕微鏡

レーザ顕微鏡は従来レゾナントスキャナやAOD（音響光学偏向器）が用いられてきたが高い周波数と大きな偏向角が求められ10年ほど前からオリンパス工業は自社レーザ顕微鏡に自社光MEMSスキャナを採用している。

二次元スキャンするために高速型電磁形光MEMSスキャナ、低速側ガルバノスキャナの構成で使用されることが多い。

(2) 距離、エリアセンサ

二次元、二次元スキャナと距離計測を組み合わせる事でエリアセンサとして使用できる。

危険場所への侵入防止、セキュリティ、交通監視システム、ロボット用センサとして10 m程度のエリアセンサが実用化されているが、同軸投受光系の場合には受光アパーチャーがミラーサイズとなるので長距離で高速な計測には光MEMSスキャナのさらなる改善が必要である。

別のアプローチとして複数のミラーを同期させて見かけ上大きな受光面を持つ試みがブラウンホーファーから発表されている¹¹⁾。

またJAXAでは光MEMSスキャナの小型軽量を生かした衛星着陸用としてのセンサシステムの研究が行われていたり¹²⁾、東京大学では独自の二次元光MEMSスキャナの構造で自動車衝突防止用のセンサの研究を行っている¹³⁾。

(3) メディカル用途

光MEMSスキャナの小型、省電力を生かしてメディカル用途も研究されている。

カテーテルから体内に挿入し検査や治療ができる可能性が高まっている¹⁴⁾。

4. 光MEMSスキャナの計測

光MEMSスキャナによるレーザスキャンはテレビジョンのようなラスタースキャンの他に、両方の共振を使用したリサージュのようなスキャンがある。いずれの方式にしてもスキャン出力が歪み無く、均一にスキャンでき何時も同じ場所にスキャンすることが必要であるのでこれに対する評価が必要になる。

(1) ジッタ

主走査方向（高速側）については走査毎に走査速度が異なると出力の歪となる。このパラメータがジッタで通常走査幅での時間の変動をパーセントで表す。測定方法としては走査内に2つのレーザ検出センサを設けてその時間を連続計測する。高速の検出センサと100 ps以下の分解能を持つ時間計測システムが必要である。

(2) ウォブル

副走査方向（低速側）について走査ごとに走査位置が異なると出力の歪となる。このパラメータがウォブルで通常一定回数での副走査方向の変動の最大値とその中での最大偏差をP-P及び隣接として評価する。光

MEMSスキャナの場合には走査位置によって変動することがあるので、走査域内で複数の位置で確認する必要がある。

(3) 最大振り角

スキャナとして最大の走査角度は重要なパラメータである。ただ共振形では最大振り角は走査の折り返し点でもあり、走査速度はゼロとなる。副共振が加わると最大振り角も変動することがあるので正確に最大振り角を位置として測定するのは難しい場合がある。共振での位置は通常正弦波形となっているので角度の分かっている2点間の時間を計測することにより、最大振り角を時間換算で算出する方法もとられている。

(4) 共振周波数

最大振り角は共振点で得られるのと、通常同一ロット内であっても共振周波数がばらつくため、個別に共振周波数の測定が必要である。測定開始周波数とステップ周波数、ステップ時間と周波数の変化方向のパラメータで測定する。いかに短い時間内で共振周波数を測定するにはデバイスの特性を把握しておく必要があり、デバイスによっては非線形の共振を使用しているものもあるので注意が必要である。

当社ではこれらの光学、電気パラメータを自動で測定するシステムを開発し、多くの企業や研究機関で使用していただいている。

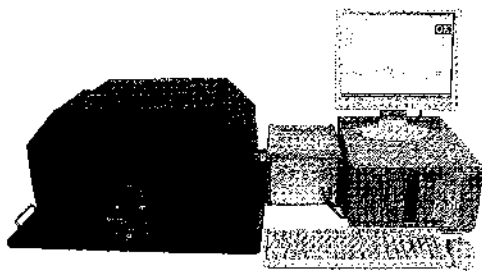


写真3 MEMS計測システム

表1 主な仕様

基本計測方式	ウォブルジッタ	3角スリット時間変化検出方式 2点間タイムインターバル検出方式
測定対象	対象品種	1軸MEMS (2軸MEMSオプション対応)
	光学振り角	±15°以上 (オプションで微小角対応可)
	ミラーサイズ 駆動周波数	1.2×1.2 mm以上 60~30 kHz (オプションで30 kHz以上対応可)
	測定用光源	測定用光源: 670 nm, 2 mW
測定項目	ジッタ	測定分解能: 0.1 ns
	ウォブル	測定分解能: 1 μm
	最大振り角	測定分解能: 0.1 ns
	共振周波数 共振周波数	測定分解能: 0.1 ns 測定分解能: 0.1 °C

エーエルティー㈱のモデルALT-9A44⁽⁴⁾ (写真3) は各パラメータを測定するとともに、オプションとして共振パラメータである圧力、温度を変えられるチャンバーや耐久試験にも対応している。タクトタイム10秒以下も可能で、インラインでの検査も可能である。表1に主な仕様を示す。

5. おわりに

光MEMSスキャナは日本の将来技術のなかでも重要な技術と考えられる。

従来から築かれてきた微細加工技術とともにその測定評価技術はこれから世界の中で日本の担う役割にも関連し、益々の発展を願いたい。

当社でも“明日を拓く、光MEMSスキャナ”の専用サイトを立ち上げ⁽⁵⁾情報の提供を行っており、デバイスメーカー、アプリケーションメーカー、ユーザー間の橋渡しができればと考えている。

＜参考文献＞

- (1) 日本信号: <http://www.signal.co.jp/vbc/mems/info/index.html>
- (2) マイクロビジョン: <http://www.microvision.com/>
- (3) マイクロプレジジョン: <http://www.mpc1.co.jp/>
- (4) テキサス インスツルメンツ: <http://focus.tij.co.jp/jp/analog/docs/memstoplevel.jsp?sectionId=623&tabId=2458&familyId=1744>
- (5) オーパスマイクロシステム: <http://www.opusmicro.com.tw/>
- (6) フラウンホーファー: <http://www.ipms.fraunhofer.de/>
- (7) 産業技術総合研究所: http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100209/pr20100209.html
- (8) ブラザー工業: <http://www.brother.co.jp/news/2009/rid/index.htm>
- (9) 日経Tech-On紹介記事: <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100219/180432/>
- (10) フラウンホーファー: <http://www.ipms.fraunhofer.de/common/products/MSD/lamda-e.pdf>
- (11) ISASニュースNo.349 (2010年4月)
- (12) 研究論文: http://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/56/1/116/_pdf
- (13) 光マイクロスキャナーの低侵襲医療への応用 芳賀洋一・他: O plus E (2010年5月)
- (14) 光MEMSスキャナ評価、検査システムALT-9A44 <http://www.alt.co.jp/pdf/alt9a44.pdf>
- (15) 明日を拓く光MEMSスキャナ: <http://www.alt.jp/>

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL: 03-5946-7336 FAX: 03-5946-7316

1. はじめに

米国以外にもアジア・欧米の各企業がプロジェクターの軽量化に乗り出ししのぎを削っている。そのような中で、パーソナルプレーヤーや携帯電話などのモバイル機器に接続して使用する手のひらサイズの超小型プロジェクター（ピコプロジェクター）が注目を集めている。現在、超小型プロジェクターで実用化されているものには3つの方式がある。

(1) LCOS 方式

主に光源はLEDが使用され、スキャンデバイスとしてはシリコン基板の上に液晶を形成し、光を反射または透過させて表示させる方式のLCOSを用いている。

(2) DLP の方式

CMOS半導体上に独立して動くミラーが48万～200万個敷き詰められた構造で、DLPチップにLEDやレーザー光をあてて、ミラーに反射した光を投影し表示する。

※ (1), (2) はデバイスの分解能が画像分解能になるため、現状の表示分解能としてはVGA程度。

(3) 光 MEMS スキャナー方式

光源に小型で高出力、高効率な半導体レーザー光を用い、微小な2次元スキャンできる一枚ミラーの光MEMSスキャナーでレーザー光をスキャンする方式。この方式では高分解能が可能なこととフォーカスフリーが可能という特徴がある。

エーエルティーでは、今後の開発が期待される光MEMSスキャナーの開発に欠かせない評価装置を供給しており、今回その詳細を紹介する。

2. 評価の基準

光MEMSスキャナーは現在注目の開発途上のデバイスであり、評価の方法が確立しているわけではない。当社では、ポリゴンミラースキャナーの評価装置・検査装置を多数のレーザープリンターや複写機のメーカーに幅広く、かつ数多く供給している実績を持つ。

ポリゴンミラースキャナーの場合、大規模な生産が行われており、高速化や多色化などに関する新しい技術に

対する開発は継続して行われているが、基本的な評価・検査方法はほぼ確立されている。

当社は、従来からユーザーの要望に応じて光MEMSスキャナーの検査機を少しずつ手がけてきたが、2007年よりポリゴンミラースキャナーの評価方法をベースに光MEMSスキャナーの標準的な検査装置である光MEMSスキャナー検査システム（ALT-9A44）の販売を開始し、積極的に営業展開を進めている。

このような経緯から当社はポリゴンミラースキャナーの評価方法を参考に、光MEMSスキャナーの標準機として評価していただくことを目標として評価方法の標準化を図り、評価・検査装置の開発・供給を行っている。

3. 測定対象：標準機「光 MEMS スキャナー検査システム（ALT-9A44）」

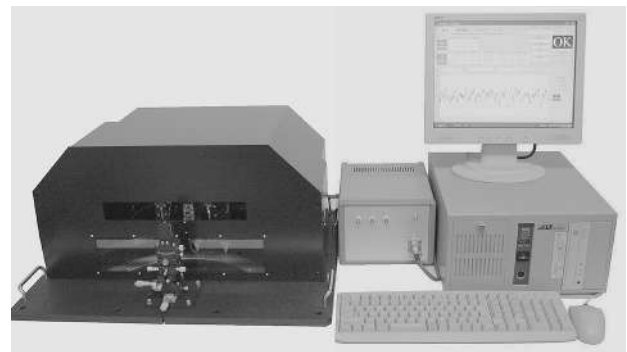


図1 光MEMSスキャナー検査システム ALT-9A44

<仕様>

対象品種：1軸MEMS（2軸MEMSも可能、後述）

対象方式：電磁駆動、静電駆動、 piezo駆動

光学振り角： $\pm 15^\circ$ 以上（ $\pm 15^\circ$ 以下はセンサーユニットを変更することで対応可能）

ミラーサイズ：1.2×1.2mm 以上（基準の光源の変更が可能、応相談）

駆動周波数：60～30KHz（30KHz 以上も応相談）

測定用光源：670nm, 2mW（他波長、出力対応可能）

4. 測定仕様

以下、光MEMSスキャナー検査システム（ALT-9A44）の測定仕様とその特徴を説明する。

■ 製品紹介 ■

レーザーの基準光源からコリメーションレーザー光をMEMSのミラーに照射し、反射光が走査（スキャン）される状態において2個のジッタセンサーおよび1個のウォブルセンサーでビームスキャン検出時間を測定することが基本動作となっている。

4.1 周波数特性、共振周波数測定、振幅測定

（センサー：2ポジションのジッタセンサーを使用、測定分解能：0.1ns）

周波数特性（周波数－振角特性）は、設定した条件にて周波数を変化させ振れ角を測定する。設定される計測条件は電圧／電流、変化する周波数範囲、周波数ピッチなどである。

実用的な測定を高速に行えるように、当社独自の方式として、2点のジッタセンサー信号の時間間隔から振幅を計算する簡易光学振り角測定方法を採用している（ビーム走査が基本的に正弦波の動作であるということを前提に、特許取得）。この方式を採用することで、周波数特性測定、共振周波数測定はストレスを感じない速度で計測が可能である。また、電圧・電流の設定を変えての周波数特性が測定できるだけでなく、目標とする振幅を設定し、適切な周波数や電圧・電流をサーチするような動作も可能である。多くの実績から、ビーム走査が基本的に正弦波の動作であるということを前提とした計測による疑義はほとんど無視できると考えられる。

また、得られた周波数特性のプロファイルから共振周波数を求めることができる。周波数特性のプロファイルに関しては、共振周波数から比較的離れた周波数での特性も把握したい場合には、2点のジッタセンサーの間隔

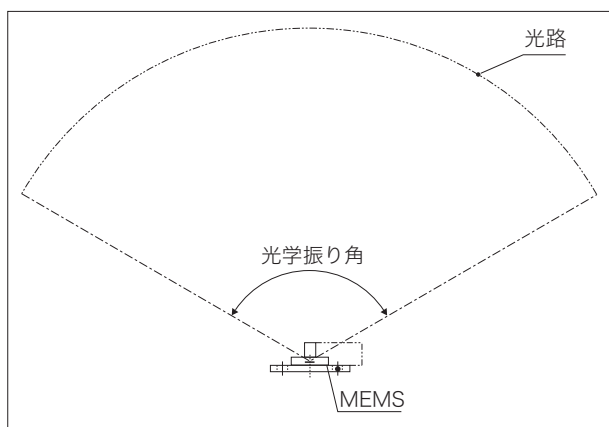


図1

を狭く設定する必要がある。このために、10mmもしくはそれ以下の間隔で2点のジッタセンサーを配置したセンサーを用意している。

4.2 簡易光学振り角測定方法について

（前項に上げた簡易光学振り角測定方法の詳細を示す）

図1のように、レーザーをスキャンさせた時のスキャン角度（レーザー光の広がり角度）を光学振り角と定義する。図2のセンサー配置のように、光MEMSスキャナーにより走査されたレーザー光を距離 L の位置に設置したジッタセンサーで受光する。光MEMSスキャナーの走査速度は、半径 L の位置での円弧上をほぼ正弦波で変化するので、それを半径 R の等速円運動と仮定して、それぞれの時間から光学振り角を計算する。この時、光MEMSスキャナーの動作周波数 f と等速円運動の角速度 ω は、 $\omega=2\pi f$ の関係がある。

図3（光学振り角計算1）より、円弧の長さ R_1 は、

$$R_1 = 2\pi L \times (\theta_1 / 360) \quad \text{①}$$

となる。同様に、図3（光学振り角計算1）より、円弧の長さ $2R$ は、

$$2R = 2\pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$

と表せ、

$$R = \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \quad \text{②}$$

となる。

また、図3（光学振り角計算1）の円弧長 $2R$ を直径とする円周上を等速運動すると仮定するので、図4（光学振り角計算2）のように定義する。

図4（光学振り角計算2）より、余弦の長さ $R - R_1$ は、

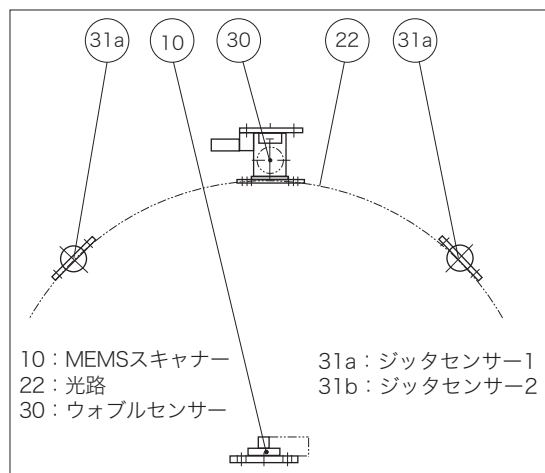


図2 センサー配置図

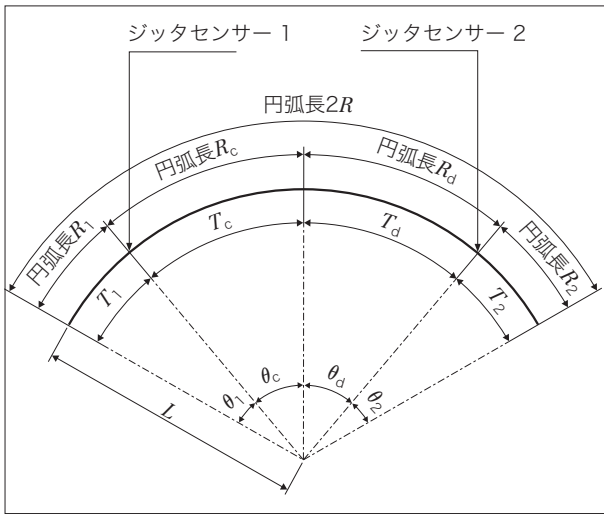


図3 光学振り角計算1

$$R - R_1 = R \cos(2\pi f T_1)$$

と表せ、

$$R_1 = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} \times R \quad (3)$$

となる。③式と②式より、

$$\theta_1 = A \times (\theta_2 + \theta_c + \theta_d) \quad (4)$$

となる。ただし、 $A = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_1)\}$

また、前記と同様に R_2 について計算すると、図3 (光学振り角計算1) より円弧の長さ R_2 は、

$$R_2 = 2\pi L \times (\theta_2 / 360) \quad (5)$$

となる。同様に、図3 (光学振り角計算1) より円弧の長さ $2R$ から R を求めると、

$$R = \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \quad (2)$$

となる。

また、図3 (光学振り角計算1) の円弧長 $2R$ を直径とする円周上を等速運動すると仮定するので、図4 (光学振り角計算2) のように定義する。図4 (光学振り角計算2) と、余弦の長さ $R - R_2$ より、

$$R_2 = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} \times R \quad (6)$$

となり、⑥式、⑤式、②式より、

$$\theta_2 = B \times (\theta_1 + \theta_c + \theta_d) \quad (7)$$

となる。ただし、 $B = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_2)\}$

④式と⑦式より、

$$\theta_1 = AB\theta_1 + A(1+B)(\theta_c + \theta_d) \quad (4)$$

となる。

ゆえに

$$\theta_1 = A(1+B)(\theta_c + \theta_d) / (1 - AB) \quad (8)$$

である。

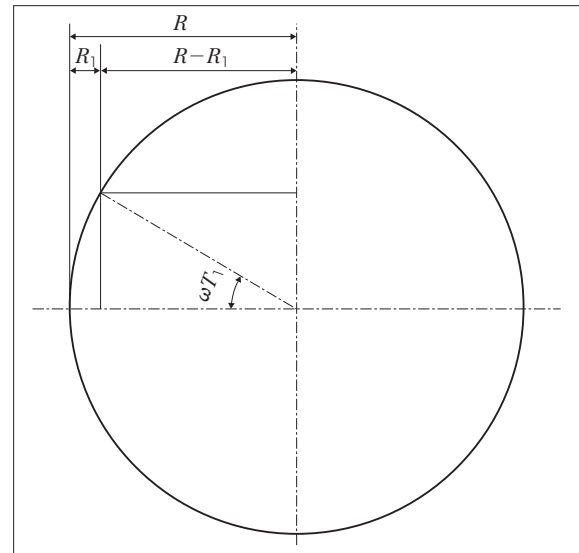


図4 光学振り角計算2

これにより、⑧式に時間 T_1 と T_2 を代入すれば、 θ_1 が求まる。また、⑦式に時間 T_1 、 T_2 と θ_1 を代入すれば、 θ_2 が求まる。

最終的に、図3 (光学振り角計算1) において左右の光学振り角は、

$$\text{左側の光学振り角} = \theta_1 + \theta_c$$

$$\text{右側の光学振り角} = \theta_2 + \theta_d$$

で計算できる。

4.3 ジッタ測定

(センサー：2分割 PIN フォトダイオード2個，受光範囲：走査位置から上下±1mm，測定距離：ミラー位置より距離100～150mm，設定位置：任意設定(±55°以上)，センサー位置調整範囲：副走査方向±4mm，測定分解能：0.1ns)

ジッタとは、ある2ポイント間のレーザー走査時間のバラツキ量であり、ジッタセンサー2点間のビームスキャン時間の測定を行い、そのジッタを評価・検査する(図5)。

光 MEMS スキャナーはミラーが振れることにより、行きのスキャンと帰りのスキャンが発生するが、行きのスキャンを CW、帰りのスキャンを CCW と呼ぶ。

測定は、ビームディテクタ2点間の CW 方向の時間測定を行い、続けて CCW 方向の時間測定を行い、次に CW 方向の時間測定を行うという動作をあらかじめ設定した測定条件に基づいて、例えば1000回の往復動作での測定を連続測定する。その後、CW および CCW それ

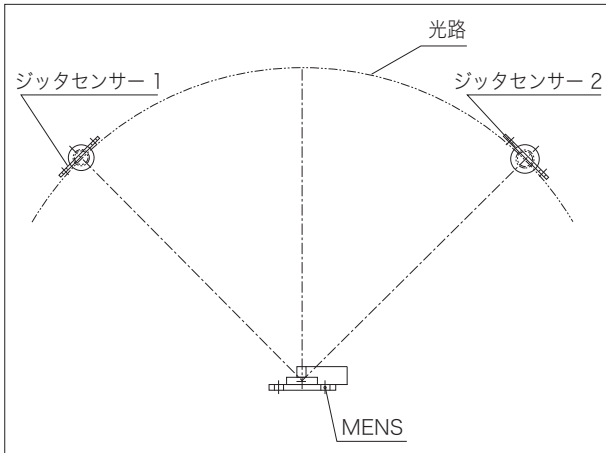


図5

ぞれの計測値の値をグラフ化すると共に平均に対する変動の計算を行う。

- ① 総合 (PP) : 連続測定での (最大-最小) の値を全平均で割った値 (%)
- ② 隣接 (FFmax) : (隣り合ったデータの差) / 全平均 × 100 (%) の最大値
- ③ 標準偏差 (σ) : データ数 n , n 番目のデータ値 X_n , 平均値 μ とすると, $\sigma = \sqrt{1/n \times \sum (X_n - \mu)^2}$

ジッタの測定は2点のジッタセンサーを最大振り角の60%程度の角度で左右対称に設定して測定されることが一般であるが、ジッタセンサー2点間の距離を10~20mm程度に短くし、振り位置においてジッタの変動を評価することもミラーの挙動を把握するには有用である。

4.4 ウォブル測定

(センサー: PDセンサー (三角スリットタイプ), 測定距離: ミラー位置より距離100~150mm, 設定位置: 任意設定 ($\pm 40^\circ$), 測定ビーム速度: 10,000m/S以下, 受光範囲: ± 1.5 mm, 測定分解能: $1\mu\text{m}$)

ウォブルとは、ポリゴンスキャナーでいう面倒れ量の

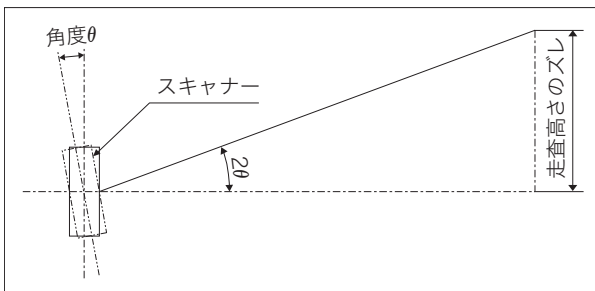


図6

ことで、走査位置のバラツキ量である。

測定はCW方向の走査位置測定を行い、続けてCCW方向の走査位置測定を行い、次にCW方向の走査位置測定を行うという動作を、予め設定した測定条件に基づき連続測定する。例えば、1000回の設定の場合、1000回の往復動作を連続測定し、その後CWおよびCCWそれぞれの計測値の値をグラフ化すると共に平均に対する変動の計算を行う。

変動は、P-P (ピーク・トゥ・ピーク) では測定回数 (例では1000回) の最大値と最小値, F-F (フェイス・トゥ・フェイス) では隣り合ったデータ差の最大値と最小値を求める。

4.5 ウォブルセンサーについて

前項で取り上げたウォブルセンサーについてその測定原理 (図6) を説明する。ウォブルセンサーはいろいろな方式があるが、本装置では三角スリット方式を採用している。

構造的には図7,8に示す構造図のように、PD受光センサーの前に三角形のスリットを配置し、スキャン中のレーザービームが三角スリットを横切ると、スリットを通過するレーザービームのみが受光センサーに入射するようになっている。このためセンサーは、レーザービームがスリットを通過した時間と同じ時間幅のパルス信号を出力する。

スリットが三角形をしているため、走査位置が変化す

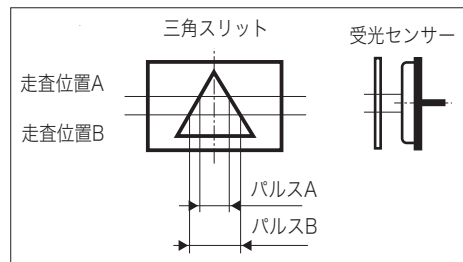


図7

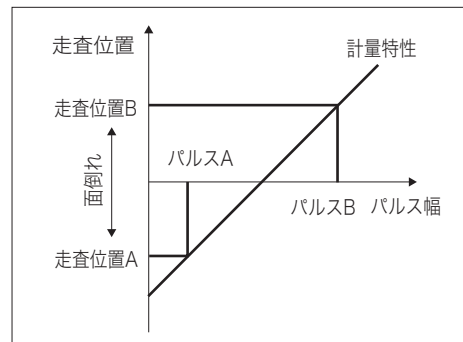


図8

るとスリット幅が変わり、センサーのパルス信号幅が変化する。このパルス幅を測定すれば走査位置が変化したことが分かるが、これだけでは「どれだけ走査位置が変化したか」が分からない。そこで、三角スリットをマイクロステージで動かし、各位置のパルス幅を測定して、直線近似した値を計量特性としている。

この計量特性は、時間を測定しているため、スキャン速度が変化すると計量特性を設定する必要がある。なお、走査位置は下記の式で求められる。

$$\text{走査位置} = (\text{計量特性}) \times (\text{センサーのパルス幅})$$

上記の方法で走査位置を測定するが、ミラー面の倒れ角として測定する場合は走査位置偏差量と測定距離のタンジェントで計算を行う。

また、光 MEMS スキャナーは測定する場所や振り角によりウォブルセンサーにおけるスキャン速度が変化するため、そのつど、計量特性を測定し直す必要がある（このため、ウォブル測定の際は測定の前に計量特性を自動で測定する）。

5. その他データ測定

- (1) 像面位置、深度位置での測定：その他のデータ測定として最も多いのは、前項までの基本特性を像面の各位置および深度方向位置で評価・測定の要求である。この場合は、同時に全自動で各ポジションでの測定が必要になるため全自動の測定となる。
- (2) インターバル測定：一定のインターバル時間間隔にて前項までの基本特性を自動測定し、経時変化による特性変化の評価計測が可能。
- (3) 位相測定：駆動信号に対してのミラー挙動の位相測定、加えて MEMS センサー自身がモニターセンサーを搭載している場合は、その出力との位相差の測定。
- (4) 駆動電圧、電流の位相差：光 MEMS スキャナーの駆動方式から要求される各種評価・規則に対応。

6. 2次元光 MEMS スキャナーの測定

2次元光 MEMS スキャナーの評価・計測は一方向を測定した後 90° 本体を回転し、他の一方を評価・測定することが基本であるが、一般に 2次元 MEMS の場合はラスタースキャン動作を行うことが多い。

この場合、片軸を固定した状況で一方を評価するのは実際のアプリケーションに対し、十分な評価・測定とはいえない場合がある。そこでラスタースキャンを行っている状態で像面における任意のポジションでのスキャ

ン位置の測定を行う。基本的な考え方は、測定に使用しているレーザー光源を水平走査に同期して ON / OFF 制御し、測定したいポジションの任意の水平スキャンラインのみ発光を行うことで、前述した方法でウォブル、およびジッタを測定する。

また、大型の高応答度 PSD (45mm 角) センサーなどを使用し、2次元像面での位置偏差の測定も可能である。

2次元光 MEMS スキャナーの評価・計測は、アプリケーションの要求に応じた各種検出方法があり、一般性は得にくくなる傾向がある。

7. 環境試験

光 MEMS スキャナーは温度、気圧等の環境の変化に対してパラメーターの変動が大きく発生する傾向がある。通常環境試験器では十分な対応できないことが多く、専用の環境試験装置の要求が多々ある。

(1) 温度試験

前述の基本特性に関し、温度による変動を測定したい場合は、全体の測定装置全体を恒温槽に入れるわけにはいかず、また、通常 MEMS をベアの状態では評価することになるため、空気の流れが発生しないように万全を尽くす必要がある。このため、ファンなどによる空気の流れが発生しない特殊な小型チャンバーを用意している。

通常は常温から 80°C 程度の高温に対する恒温チャンバーが一般的であるが、-20°C、120°C の対応も可能である。

(2) 減圧・真空試験

前項に示したチャンバーを使用し、減圧状態での試験も可能である。通常は大気圧から 10Pa 程度が一般的である。また、他の気体の充填雰囲気での評価試験も可能である。

8. 耐久試験

5章でご紹介したインターバル試験とは異なり、より長時間の耐久試験が可能である。複数台の光 MEMS スキャナーを一定振幅動作等の制御駆動を行うと同時に常時動作状況をモニターし、不具合が発生した際の動作状況を評価・計測することができる。

耐久加速のために光 MEMS スキャナーを小型恒温槽に収納した測定も可能であるだけでなく、より簡単に簡易バーンインユニットを使用することもできる。

また、動作状況のモニターの必要がなく、一定条件での動作を前提にした耐久試験の場合は、複数チャンネル

の周波数発生モジュールと複数チャンネルの簡易アンプでの駆動もできる。

9. その他評価

- (1) ミラー面傷，異物検査：画像処理システムで傷，異物の検出が可能。
- (2) ミラー反射率測定：RGB 各波長における反射率を測定（入射角，偏光方向可変可能）。

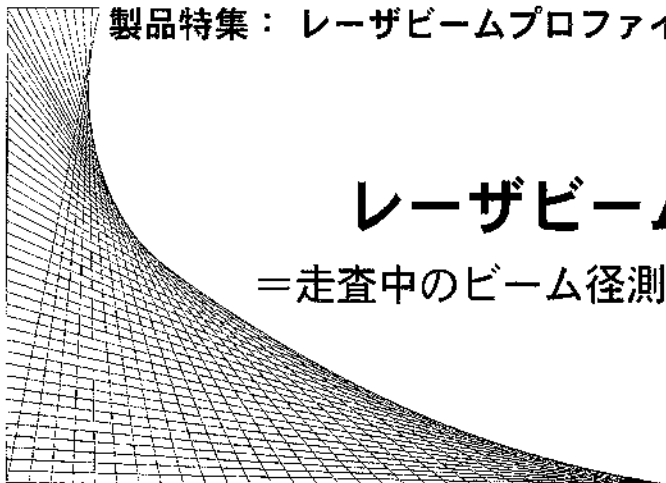
10. 最後に

光 MEMS スキャナーは超小型プロジェクターの発売が始まり脚光を浴びているが，それだけでなく，これま

での光スキャナーシステムの応用を広げる大きな可能性をもっている。その一つの方向としてスキャン系のレーザーレーダーの応用がある。TOF（タイムオブフライト）方式により，中距離から遠距離の2次元エリアの距離計測（3次元把握）が可能であり，自動車を始めとする移動物体の“眼”もしくは安全に関する用途の展開が期待されてる。この他にも，いろいろな用途に関する相談がユーザーからあり，今後の発展が期待される。

参考文献

- ◇ 井上裕幸（エーエルティール）：“MEMS スキャナーの測定”，光アライアンス（2007年10月）



レーザビーム径の測定

＝走査中のビーム径測定へのアプローチ＝

エーエルティイー(株) 井上 裕幸

1. はじめに

レーザビーム径を測定する方法は大きく分けて、回転スリットタイプとカメラタイプがある。

それぞれの方式には利点と欠点があるので、特徴を説明する。

回転スリットタイプは、測定できるレーザパワーのレンジが広く、測定分解能が高いため安定したビーム径が測定できるのが利点であるが、パルス点灯や走査中のビーム径は測定できない。また、二次元プロファイルが複数のスリット角度による光量変化データから合成しているので変形ビームの測定値は実際と異なる場合がある。

カメラタイプは、パルス点灯や走査中のビーム径が測定でき、二次元プロファイルを直接的に測定できるのが利点である。また、回転スリットタイプよりも安価で購入できる。

しかし、測定できるレーザパワーのレンジが狭く、NDフィルタ等でレーザパワーを減衰させたり、測定分解能が画素サイズで制限されるので、測定分解能が悪くなり、小さいビーム径を測定するには、レンズでレーザビームを拡大しなければならない。ビーム径を測定する場合は、どのような状態のレーザビームを測定したいのか使用目的に合わせて、ビーム径測定器を選ぶ必要がある。

2. 市場の現状と要求

当社では、レーザプリンタの基幹パーツであるLSU（レーザスキャンユニット）の検査装置を長年手がけてきた。

検査装置としては2種類あり、スタティック検査装置では、LSUが停止した状態で、ビーム径を測定する。ダイナミック検査装置では、LSUが駆動した状態で、面倒れとジッタを測定する。

スタティック検査装置においてビーム径測定は従来、デファクトスタンダードな市販の回転スリットタイプのビーム径測定器を使用していた。カメラタイプの方が安価であるが、LSUの場合、ビーム径が60 μm 程度と小さいので、分解能が十分ではなかった。ところが最近では、ユーザーニーズとして生産工程と工程時間の両方を削減する為に、LSUを駆動させた状態で、全ての項目を測定する要求が大きくなってきた。そのニーズに対応するため、走査中のレーザビーム径を測定するには、CCDカメラもしくはCMOSカメラで測定する方式が取られている。

しかしながらこの方式では、パルス点灯するタイミング信号を作らなければならない。

その為、レーザを必要なタイミングで高速にパルス点灯しなくてはならない。また、カメラの感度が足りない場合が多く、複数回のパルス点灯を露光するので、スキヤナの面倒れ、ジッタの影響で、実際のビーム径より大きく測定される場合がある。

面倒れが大きい場合は、副走査方向のビーム径が大きくなり、ジッタが大きい場合は、主走査方向のビーム径が大きくなる。同様に、タイミング信号がばらついたり、レーザのパルス点灯が高速で点灯できない場合も、主走査方向のビーム径が大きくなる。カメラタイプが持つこれらの問題点を解決する手段が必要となっている。

0917-026X/10/¥500/論文/JCLS

3. 解決手段 1

カメラタイプが持つこれらの問題点を解決するため、スリットタイプを検討する。

LSUの場合、ビームが一方方向に、かつ一定速度で移動するので、ビームを切断する為にスリットを回転させる必要がない。但し、このままでは、主走査方向のビーム径のみでしかプロファイルデータが取得できないので、ビームを切断する角度を変更して、副走査方向のビームプロファイルを合成する。

この方法で開発をしたのが、ダイナビーム（型式：ALT-8180）（写真1）である。

具体的な構成は図1のようになる。

センサーヘッドは、高速受光基板の前にナイフエッジスリットを取り付け、回転ステージでナイフエッジスリットの角度を変化させる。さらにビームの走査速度を測定する為に、受光センサーを2個設置している。

コントロールは、PCで行なう。ナイフエッジスリットの角度を設定しながら、プロファイルデータを高速AD

ボードで取得し、副走査方向のビームプロファイルを合成する。後は、ビームの走査速度から、ビーム径を計算する。

この場合、ビームの走査速度は3,000 m/s程度まで対応可能であるが、副走査方向のビーム径を測定する為に、同一スキャンでのビーム径を測定する事は難しく、複数回スキャンでの合成されたビームプロファイルとなる。つまり、カメラタイプと同様に、面倒れやジッタの影響を受けてしまう。

4. 解決手段 2

先に述べた誤差要因を取り除く為には、1スキャンで1データを取得しなければならない。

そこで、主走査方向のプロファイルデータを10 μm幅のPDで取得し、副走査方向のプロファイルデータをラインCCDで取得する。この方法で開発をしたのが、スーパーダイナビーム（型式：ALT-9B30）（写真2）である。

具体的な構成は図2のようになる。

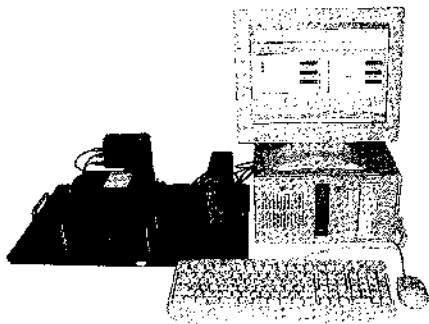


写真1 ALT-8180

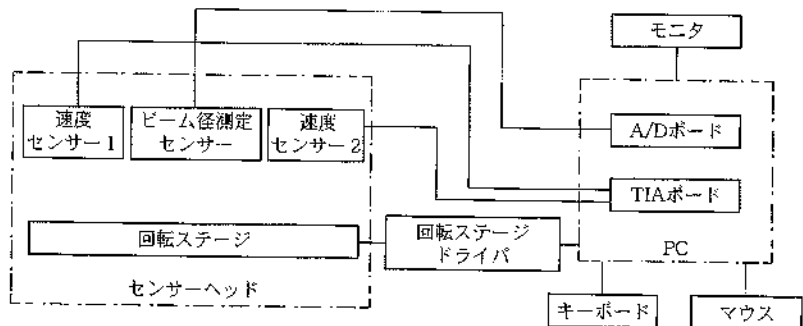


図1 構成



写真2 ALT-9B30

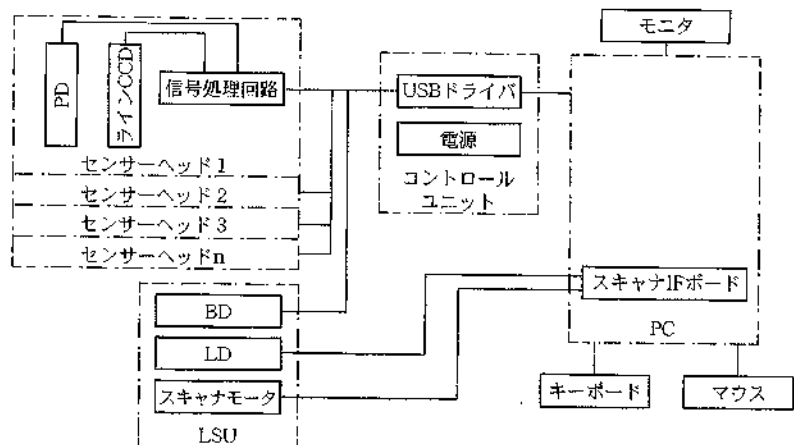


図2 構成

センサーヘッドは、新規製作10 μm 幅のPDと市販の4.7 μm ピッチラインCCDを使用し、信号処理回路を通してUSB通信ボードにデータを送ります。センサーヘッドは16個まで増設可能である。

PCとはUSBにて通信し、高速にデータを転送するので、ほぼリアルタイムにプロファイルを測定できる。この構成にする事により、1スキャンでビーム径を測定でき、面倒れやジッタの誤差要因を軽減できる。

現状では、PDサンプリング速度とメモリの制限から、走査速度が1,000 m/s未満で、ビーム径が200 μm 以下の仕様になる。さらに、PDとCCDを同じ位置に設置できないために、主走査方向のビーム径と副走査方向のビーム径を測定する位置が10 mmずれている。

5. おわりに

これまでは、LSU用のビーム径測定方法を検討してきた。

ところが最近、光MEMSを使用したスキャナが登場してきた。光MEMSスキャナの場合、ミラーが薄いので、駆動している時のミラーの歪みをチェックする事が必要になる。

そこで、走査中のビーム径を測定したいという要求が出てくる。なぜならば、光MEMSスキャナは共振させないとミラーが動作せずミラーを止める事ができないので任意の位置でビーム径を測定するには、走査中に測定しなければならない。

一次元の光MEMSスキャナであれば、ダイナビームおよびスーパーダイナビームを改善すれば、対応可能である。具体的には、光MEMSスキャナは共振しているので、往復スキャンとなる。

これに対応するには、レーザを片側スキャンのみ点灯するか、片側スキャンの信号のみ取り込む方法がある。

これに対して二次元の光MEMSスキャナは、プロジェクタの用途が多く、走査速度が非常に高速である。従って、センサー自体の応答が問題となり、センサーが応答したとしてもダイナビームでは、ナイフエッジスリットの角度を変更している間に副走査するので、受光できない。

二次元の光MEMSスキャナのビーム径を測定するには、カメラタイプで、1パルスで十分感度が取れる事が必要になる。

【筆者紹介】

井上裕幸

エーエルティー㈱ 開発部 グループリーダー
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL: 03-5946-7336 FAX: 03-5946-7316

『日・韓・英』技術用語ハンドブック

B6判・390頁 定価:2,625円

『日・中・英』技術用語ハンドブック

B6判・400頁 定価:2,625円

「建築・土木」、「電気・電子」、「機械」、「コンピュータ・情報処理・通信」、「環境」の六分野の頻出用語を収録。

日本工業出版（株）

フリーダイヤル  0120-974-250 netsale@nikko-pb.co.jp

光学スキャナ・モジュールを使ってみよう

レーザー走査による 外形測定器の試作

高野 裕

Hiroshi Takano

昨今、携帯電話やデジタル・カメラに小型プロジェクタが組み込まれるようになりました。実用化されている小型プロジェクタの方式は、画素数分の小型ミラーを集積した構造のDMD(Digital Mirror Device)や液晶シャッタを用いるLCOS(Liquid Crystal on Silicon)、そしてレーザーを小型スキャナで走査して画像を出すものがあります。

画像の解像度や色の再現性からはレーザー・スキャンの方式が優れているといわれており、このキー・パーツとなるのが光MEMS(Micro Electro Mechanical System)スキャナです。MEMSは、マイクロマシンといわれる技術で、電子回路や機械などを集積した小さい素子のことです。

今回、市販のレーザー・スキャナ・モジュールを使い、走査幅20mm、分解能約5 μ mの外形測定器を試作しました。写真1に全体の外観を示します。

レーザー・スキャンの特長と応用例

レーザーなどの光ビームを走査することを、レーザー・スキャンといい、古くから身近なものにも応用されて

います。例えば、レーザー・プリンタは40年近くの歴史があり家庭でも使われるようになりました。事務所やコンビニエンス・ストアのコピー機も、レーザー・プリンタが使われています。スーパーマーケットでレジにあるバーコード・リーダーもレーザーを走査してバーコードを読み取っています。

このほかにも、工業用では、レーザー顕微鏡や光造形、外形測定器、プリント基板の穴あけのシステムに利用されています。距離計と組み合わせて踏み切り内の安全管理や宇宙での惑星探査などにも使われています。

● メリットは…高分解能、高速、測定パラメータの時間変換が可能

例えばレーザー・プリンタは、家庭用のものでも分解能600dpiです。600dpiは1インチ(25.4mm)当たり600ドットという意味です。1ドットが0.042mmと非常に小さいので、文字だけでなく画像もきれいに出力できます。また、家庭用の製品でもA4サイズの紙を1分当たり20~30枚出力できます。このときレーザーが走査する速度は1km/s以上です。

もう一つのメリットとしては測定パラメータを時間

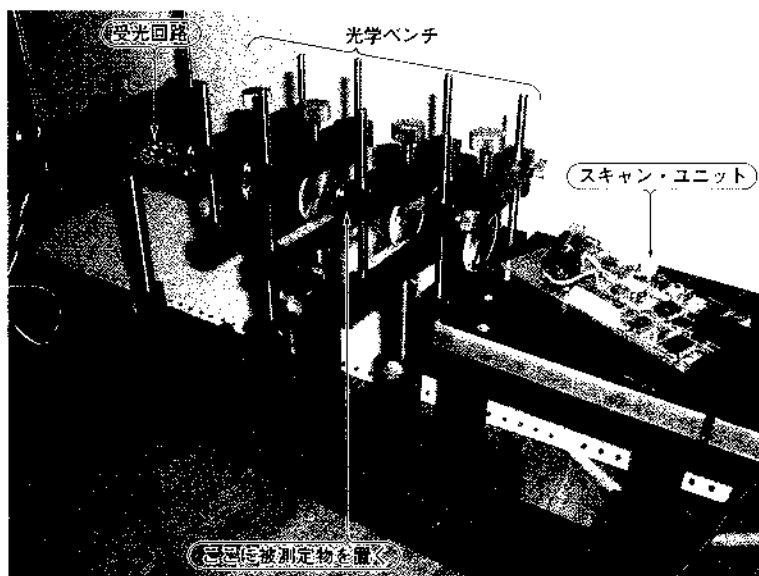


写真1 製作したレーザー外形測定器

に変換できるということです。

例えば長さを時間に変換できるので、外形測定器などでは高精度で広い範囲が測定できます。また、高速で計測できるので工場の組み立てラインに入れることもできます。

通常、長さ測定では、マイクロメータで精度良く読もうとしても**.**mmと有効数字が4けたです。1ns精度を得ることは簡単なので時間に置き換えれば簡単に6~9けたを実現できます。

● レーザ・スキャンの動作例

レーザ・スキャンの応用製品として、生産数の多いレーザ・プリンタの構成について簡単に説明します。

レーザは半導体レーザを使用し、通常は赤外の波長780nmを使用します。レーザから出た光はコリメータ・レンズで平行光に変換され、ポリゴン・スキャナというモータに多面体ミラーを乗せた光学スキャナで走査ビームになります。

ポリゴン・スキャナは高速で走査するため、最近では1分間に数万回転以上と高速で回転しています。

この後エフシータ・レンズといわれる走査速度を一定にする特性を持ったレンズを通して感光ドラムに照射されます。

半導体レーザは印字データに基づいて高速にスイッチングされ、感光ドラムには光が当たった場所と当たらない場所で電位差ができます。これにトナーを付け

て紙に転写して、熱で定着して出力されます。

カラー・プリンタでは同じようにシアン、マゼンタ、イエロー、ブラックと四つのプロセスを経て出力されます。

レーザ・スキャンを応用した 外形測定器の構成

光学スキャナは、ちょっと実験してみたいという入手が難しかったり、産業機器向けで高価であったりします。これは光学スキャナのほとんどが特注品で特定の製品向けに設計/製造されていたり、産業機器向けで非常に精度が高い製品だったりするためです。

そのなかでも比較的安価にインターネットで入手できるレゾナント・スキャナを使って、レーザ外形測定器を試作してみました。

● スキャナ・モジュールLSM100M(L)の構成

レーザ光源とドライバが一体になった1次元スキャナ・モジュールLSM100M(L)(レーザークリエイト)を使います⁽⁴⁾。写真2に外観を、図1に構成を、表1に主な仕様を示します。このモジュールの光学スキャナは構造的にはムービング・マグネット・タイプの電磁型です。完全なMEMS構造ではありませんが、14mm角程度の非常に小さな形状となっています。

レーザ光源の後ろにレゾナント・スキャナがあり、こちらで走査角約40°、周波数95Hzでレーザが走査

写真2 スキャナ・モジュールLSM100M(L)の外観

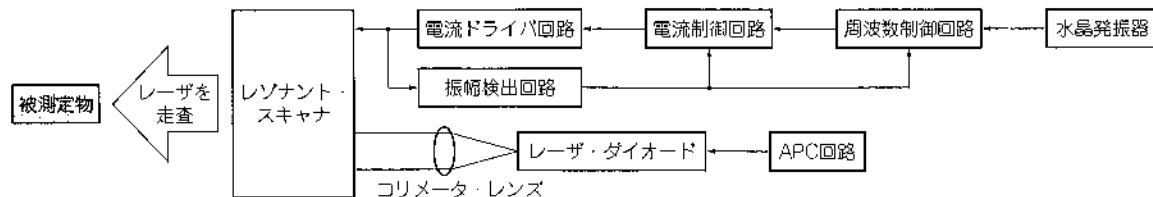
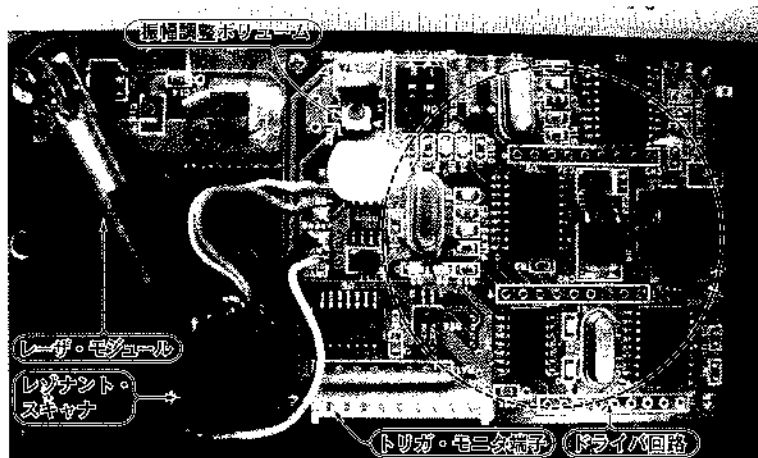


図1 スキャナ・モジュールLSM100M(L)の構成

表1 スキャナ・モジュールLSM100M(L)の主な仕様

構成	1次元スキャナ+レーザ+レーザ・ホルダ+回路基板
制御方法	PWM制御, フィードバック制御
振れ角	10°~50°(〜40°推奨, ボリュームにて任意設定)
分解能	振れ角×1/10000 精度: 振れ角×1/1000
ジッタ	0.01%以下(短期, ただし振れ角〜40°以内)
消費電力	約0.8W(3mW赤色レーザ, スキャン角40°時)
基板寸法	105×55×16mm, 各界より(3, 3)の位置に固定用穴φ2.2あり
CPU	PIC16F84×2, PIC16F88
搭載レーザ	外径φ10.5赤色1次元レーザ 外径φ10.5緑色レーザ(オプション)

されます。レーザ光源はコリメーション・レンズを内蔵したレーザ・ダイオードです。レーザ・ダイオードの放射状のビームをコリメーション・レンズで平行にします。レーザ・ダイオードはAPC(Auto Power Control)回路で安定に駆動されています。

レゾナント・スキャナはドライバ回路でユーザが指定した振り角で安定して動作するように制御されています。この放射状に振れているレーザ・ビームをレンズ系を用いて平行光で細いビームになるように絞り込みます。検出物を配置する図2に示す中央部は、走査速度が一定であることが必要です。

レゾナント・スキャナは共振を利用しているので、最大振り角で速度ゼロとなる正弦波の速度分布を持っています。この速度特性を光学的に補正するのがアークサイン・レンズですが、こちらは難しくなってしまうので今回は振り角の中央付近だけを使用することにします。最大振り角の50%を使用した場合、この中で最大の速度偏差は86%になります。

レーザの走査ビームが検出物に当たると、検出物の幅分の影ができます。検出物に当たらず通過したレーザ・ビームは入射と同じ光学系で集光されPINフォトダイオードに入力されます。

PINフォトダイオードの出力を時間経過とともに見ると遮光の時間が検出物の幅になり、走査端からの時間が検出物の位置になります。LSM100M(L)にはトリガ信号が用意されており、1周期に1サイクルの5Vのデジタル信号がコネクタから出力されています。

● 光学ベンチ

使用した1次元スキャナ・モジュールLSM100M(L)にはレーザ・コリメーション・ユニットが搭載されており、カタログから波長635nmで出力が1mWとなっています。ビーム径は記載されていませんが実測からφ3mmとします。

かつて、大きなパワーのレーザ・ポインタが目の安

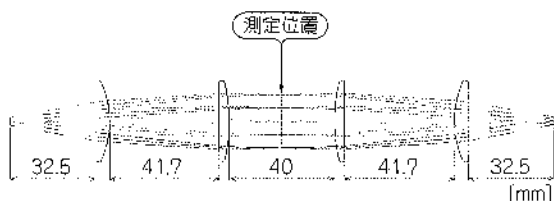


図2 市販のレンズを使って光学シミュレータZEMAXで設計したレーザ・ビーム



写真3 製作した受光回路の外観

全性の点で問題になったことがありますが、このモジュールではクラス2に分類されるレーザが使われ、安全です。ただし直接のぞき込むことは避けた方が良いでしょう。

レーザ・ビームは、市販のレンズを使い図2のように光学シミュレータZEMAXで設計しました⁽⁵⁾。レンズは、シグマ光機製の標準品の平凸レンズ2種類を4枚使っています。表面の反射をなくすためにAR(Anti-Reflection)コートをしているタイプもありますが、今回はコートなし品でも問題ありません。

光学シミュレーションでは走査幅の約20mmで20μmのスポット径が得られる計算になりました。スポットはガウス分布をしているので、ビーム径はピークを100%として13.5%のエネルギーの径で定義しています。

● 受光回路

製作した受光回路の外観を写真3、回路を図3に示します。

受光回路はビームがφ3mmくらいに集光されるので、大型のPINフォトダイオードを使います。浜松ホトニクス製のS6968はφ14mmのレンズ付きで遮断周波数50MHzの特性を持っています。

スキャナの共振周波数は95Hzで振り角40°の約50%を使用することから、20mmでの走査時間は約1.75msとなり、走査速度は11.4m/sとなります。

0.05mmの物体を検出しようとする遮光時間は4.4μsとなるので、上記のPINフォトダイオードの逆バイアス電圧を下げてでも応答は間に合いそうです。

PINフォトダイオードの電流信号をトランス・インピーダンス回路で電圧変換して増幅します。受光光量は光源が1mWですが、レゾナント・スキャナのミラ

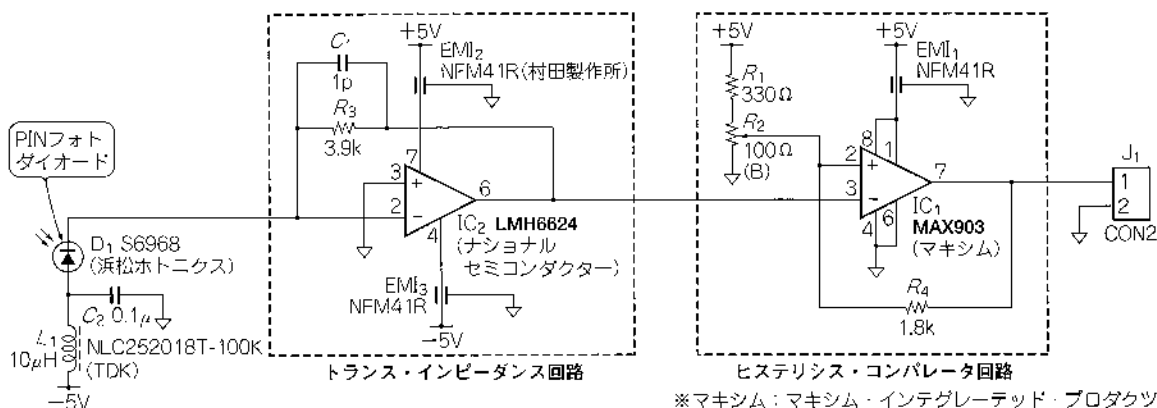


図3 製作した受光回路

一の反射率が80%とARコートしていないレンズの各面での透過率が96%くらいで8面あるので最終的には約0.5mWになります。

PINフォトダイオードの変換効率は波長635nmで0.45A/Wなので0.23mAの電流が期待できます。この電流で1Vくらいの電圧を得ようとするフィード

バック抵抗は4.3kΩと算出できます。

トランス・インピーダンス用のOPアンプは高速で低ノイズのLMH6624を使用します。

この波形をヒステリシス・コンパレータでデジタル化します。こちらも高速のものが望ましいのでMAX903を使用します。

レーザ外形測定器の試作と動作実験

● 製作

レンズは実験用として光学ベンチに組んでいきます。レンズの中心を合わせてレンズの間隔をシミュレータで設計した数値に仮設定していきます。

図4に示すように、スキャナ・モジュール側の2枚のレンズを設定できたら測定位置でビーム径を測定してみても、シミュレーションに近い値が出れば大丈夫です。

次に受光回路側の2枚のレンズを設定して、図5のように往復する受光信号時間が同じになるようにオシロスコープを見ながら受光基板の配置を調整します。

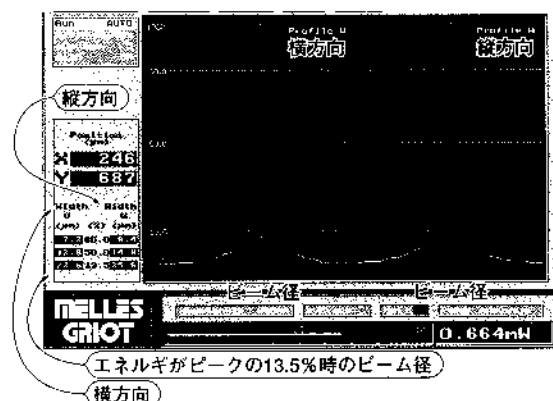


図4 測定位置でのビーム径がシミュレーション結果と合っているかを確認(縦軸:ピークに対するエネルギー比20%/div, 横軸:ビーム径25µm/div)
測定器はビーム・アナライザ13SKP7(メレスグリオ)

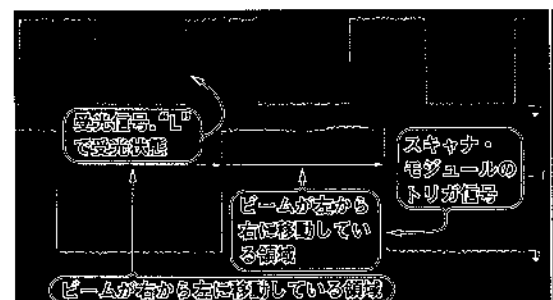


図5 スキャナ・モジュールの出力と同様に受光回路出力も“L”, “H”時間が同じになるよう受光回路基板の配置を調整する(2V/div, 2ms/div)

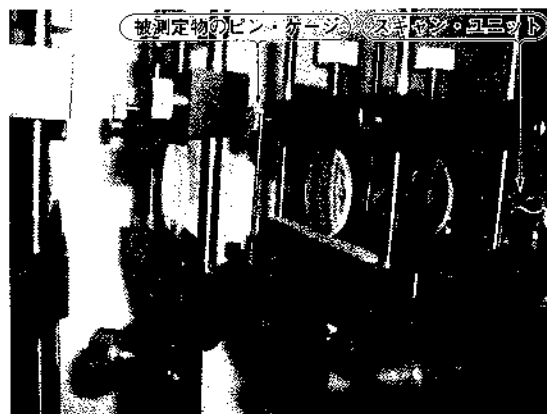
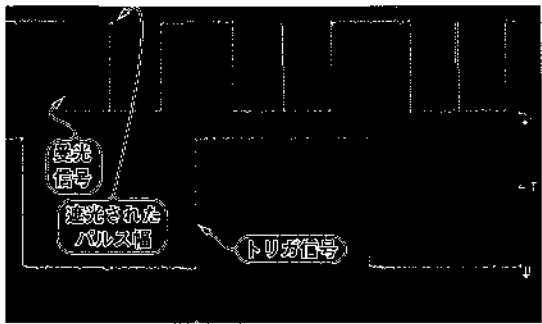
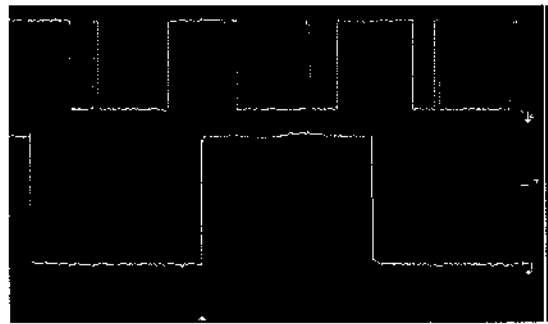


写真4 試作したレーザ外形測定器でピン・ゲージの径を測定しているようす

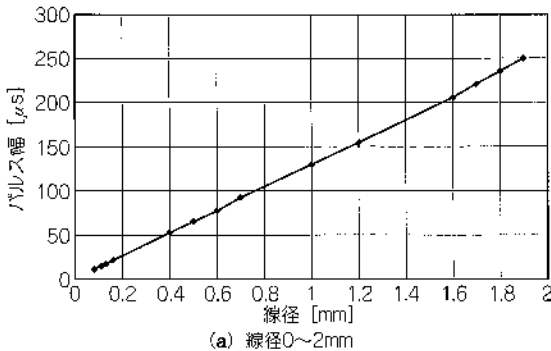


(a) 中央に置いた場合

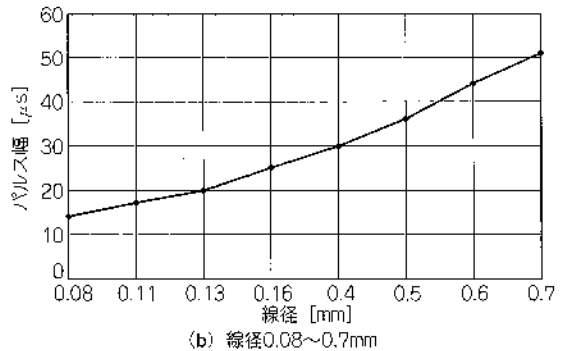


(b) 右にずらした場合

図6 被測定対象のピン・ゲージの位置を変えて測定したようす(2 V/div, 2 ms/div)



(a) 線径0~2mm



(b) 線径0.08~0.7mm

図7 測定物の線径対パルス幅は約0.1~2mmにてリニアな特性が得られている

レゾナント・スキャナのトリガ信号は、走査の端で信号が変化し“L”時が右から左，“H”時が左から右に走査している時間になります。

● 実験結果

調整が終わったら検出位置にいろいろな径の測定物体を置いて実験です。写真4に示すようにφ1.6mmのピン・ゲージを中央に入れると、図6(a)に示す受光信号が出力されます。遮光されたパルス幅が測定物体の外形を表し、トリガ信号からの時間が測定物体を入れた位置になります。

検出物の位置を右にずらしたようすが図6(b)です。走査方向が左右に入れ替わっているの、位置が走査方向に応じて変化しているのが分かります。

測定物の線径とパルス幅をプロットしたものが図7です。髪の毛の0.1mmから2mmくらいまでリニアな特性が得られています。

歯歯のようなものでもそれぞれのパルス幅とパルス間隔を測ることにより一度に測定でき、不良があった場所も特定できることが特徴です。

精度を上げるためには、走査方向で生じている走査速度の不均一性による誤差や、検出位置に対しての時

間の補正が必要になります。レーザの深度方向については、検出範囲に応じてビーム径の均一化が必要になります。

今回は時間をデジタル・オシロスコープで測定しましたが、時間間隔を正確に測定するタイム・インターバル・アナライザを用いると精度が向上します。

最近ではTDC(ACAM)といわれる専用のチップも出ていて⁽⁶⁾、100ps以下の分解能を持っています。高速にスキャンして測定することも可能になってきました。

● 参考文献

- (1) エーエルティー社のウェブ・ページ
http://www.alt.co.jp/html/sub2_3.htm#alt9a44
- (2) 井上 裕幸；MEMSスキャナの測定，光アライアンス，2008年1月，日本工業出版。
- (3) エーエルティー社のウェブ・ページ
<http://www.alt.jp/>
- (4) 御レーザークリエイトのウェブ・ページ
<http://www.lasercreate.com/products/scanner/scanner.html>
- (5) ベンチャーフォーラム三重のウェブ・ページ
<http://www.vfm.co.jp/>
- (6) ACAMのウェブ・ページ
<http://www.acam.de/>

光を走査させる光学スキャナの種類と原理

レーザをスキャンするための光偏向器を光学スキャナと呼びます。

レーザ・プリンタ用のポリゴン・スキャナは生産量も多く光学スキャナの代表ですが、そのほかにも用途に応じて色々なスキャナが開発されてきました。

特に近年では、光MEMSスキャナの開発が盛んで色々な構造が提案されています。大きく分類すると、鏡を何らかの形で振らせる機械スキャナと音響光学効果や電気光学効果を用いた電気スキャナになります。

光学スキャナの種類

● ポリゴン・スキャナ

ポリゴン・スキャナは多面体ミラーをモータの軸に取り付けた形状をしています。

通常のモータと異なるのは回転数が1分間に30000回転以上と高回転のため、一般で使用されているボール・ベアリングが使用できずオイル動圧軸受や空気動圧軸受を使っています。また多面体ミラーのそれぞれの面はレーザを反射するため精度の良い平面が必要で鏡面切削という加工方法で製造され、それぞれの面の回転中心に対しての平行度は角度として秒単位で(3600sが1")管理されています。

ミラーでは反射によって角度が倍になるため、6面のポリゴン・スキャナでは1面当たり60°回転しますので120°の角度で走査できます。

ポリゴン・スキャナはモータの回転で走査するため、走査方向は一方的で、止めることはできません。

● ガルバノ・スキャナ

ガルバノ・スキャナの構造はモータと似ておりミラーの付いたロータに磁石が配置され、外部のコイルで回転方向を制御します。通常は回転角度を検出するセンサが付いていてPID制御により高精度の位置決めができます。走査角度はミラーの大きさや駆動周波数で変わりますが、通常60°くらいで100 Hz位まで使用できます。

このスキャナの特徴は、直流で制御できるので、ある角度で止めることができ、X、Yの2軸でベクトル走査をできることです。

レーザ・ショーなどで各色のレーザが色々な模様を描いていますがこのスキャナが使われています。

● レゾナント・スキャナ

レゾナント・スキャナは構造的にはガルバノ・スキャナとほぼ同じですが、共振を利用しています。周波数は決まってしまうますが、少ない電力で大きな走査角を得ることができます。後で述べる光MEMSスキャナもこの構造をしています。

小型で構造も簡単なため、ハンディ型のバーコード・リーダーなどにも使われています。

● 電気偏向器

電氣的にレーザ・ビームを振る方法の一つに音響光学素子(AOD: Acousto-Optic Deflector)の使用があります。

これは結晶やガラスに圧電素子を貼付けて内部に超音波を発生させ、その超音波定在波でレーザをブラッグ反射させます。角度は数度以下で小さいですが1 MHzなどの高速で走査できるので、レーザ顕微鏡などに使われています。

もう一つは電気光学素子(EOD: Electro-Optic Deflector)で結晶に高電圧をかけてポッケルス効果で偏向させます。

角度は小さいですが高速で走査することができ、最近ではこの仲間のKTN(タンタル酸ニオブ酸カリウム)という結晶を使用したものが比較的大きな走査角度が得られるので注目されています。

光MEMSスキャナの原理

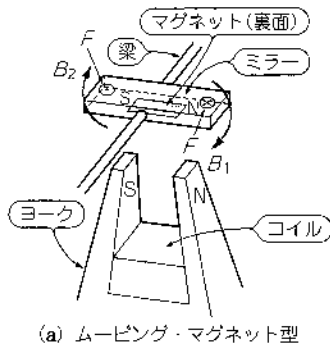
光MEMSスキャナのほとんどがレゾナント・タイプですが、用途に応じて仕様が異なります。

レーザ・プリンタ用では周波数2 kHz、走査角50°で約4 mmのミラー・サイズが必要ですが、ディスプレイ用としてはミラー・サイズ約1 mm、周波数が主走査30 kHz以上、副走査60 Hz以下と広い範囲が必要です。

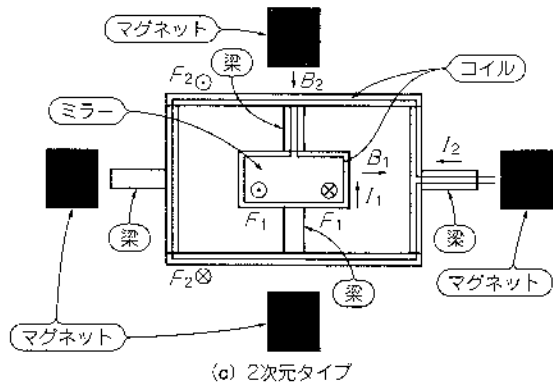
● 電磁型

ミラーを動作させる側が磁石とコイルとでムービング・マグネット型とムービング・コイル型に分類できます。

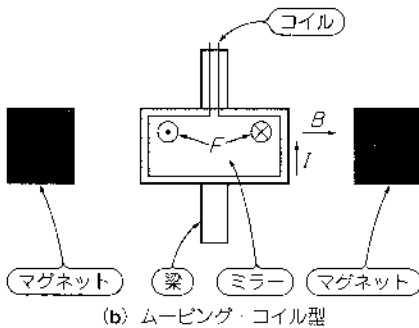
ムービング・マグネット型は、図A(a)のようにシンプルな構造で安価に構成できます。ただ磁石が可動側に付くためその重量で高い共振周波数を得るのには



(a) ムービング・マグネット型



(a) 2次元タイプ



(b) ムービング・コイル型

図A 電磁型光MEMS スキャナのしくみ

ーダンスは高いので電力としては小さくなっています。電磁型と比較すると、磁気回路が無いぶん小型にでき、2次元タイプでは軽量小型化が可能です。

● ピエゾ型

圧電素子に電圧を加えると素子が伸びたり縮んだりします。この特性を利用しているのがピエゾ型です。構造がシンプルで量産性に優れているので期待されていますが、ヒステリシスやドリフトが発生するのでコントロールが難しいです。

こちらでも静電型と同じように高い電圧が必要ですが電力も低くなっています。

複数の素子を機能的に組み合わせるなど色々な構造が提案されています。

要求される光学的/電気的な精度

ジッタと呼ばれる走査方向での速度変動は、画像にした場合、横方向のひずみになります。変動は0.1%以下であることが要求されます。

ウォブルと呼ばれる副走査方向での変動(ポリゴン・スキャナでの面倒れと同じ)は、画像では縦方向のひずみや濃度ムラになるので、角度で数十秒以下が要求されます。

共振特性は電気のLC共振回路と同じように共振周波数とQを管理する必要があります。

これらを測定するのは汎用測定器では難しく、ALT-9A44(エーエルティアー)⁽¹⁾⁽²⁾など専用の測定器が市販されています。

向いていません。

ムービング・コイル型は、図A(b)のようにコイルが可動側なので軽量化が図れますし、半導体プロセスで細かいコイルを形成できます。

回転の中心となる梁はシリコンで製造した場合、疲労が無いので機械スキャナでも寿命が非常に長くなっています。またポリゴン・スキャナのように高速回転での騒音が無く、省電力で電池のアプリケーションも可能になりました。1方向だけの1次元タイプと図A(c)のような一つのパッケージの中に主走査と副走査を組み込んだ2次元タイプがあります。

● 静電型

静電吸着力を使用するのが静電型です。吸着力は面積に比例するため、通常は楕歯型の電極を組み合わせた構造となっています。この微細な構造もMEMS技術で作られています。

静電力は電圧に比例するので、近年は低くなったとはいえ数十Vの電圧が必要です。ただ、負荷インピ

エレ基礎シリーズ

位相/複素数/フーリエ変換・・・10のツールで信号の性質と動きを捉える

合点! 電子回路超入門

石井 聡 著
B5変型判 228ページ
定価 2,520円(税込)

CQ出版社 〒170-8461 東京都豊島区巣鴨1-14-2

販売部 TEL.03-5395-2141

振替 00100-7-10665

産業界で使用されているビームプロファイラ

＝ダイナミック計測へのアプローチ＝

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

産業界ではビームプロファイラはレーザープリンタ、バーコードリーダー、レーザーディスプレイなどに使用されているが、近年になって調整、検査タクトの短縮から、ビーム走査中のビームプロファイル計測（ダイナミック計測）が求められている。

また、従来無かった光MEMSスキャナーについてはその特性上、ダイナミック計測が必要になってきている。

ビームの測定方法についてはISO11146に可変アパーチャ法、ナイフエッジ法、可動スリット法が紹介されているが、最近安価なシステムとしてCCDやCMOSのカメラベースなどのシステムが実用化されている。

ただデータの再現性を追及していくとカメラベースについては検出面と保護層、カバーガラスなどの干渉の問題から^①高価なFOP素子を使用しなくてはならない場合もあり用途に応じて選択する必要がある。

2. 生産ラインでのビームプロファイラ

レーザープリンタにおいてビームプロファイラは生産ラインで使用されている以外に部品検査としても使用されている。

特にプラスチックのfθレンズは形状も大きいこともあり、傷、気泡、異物の他に成形条件によって脈理を生じて印字品質に悪影響を及ぼす。

外観検査だけで品質を維持できないものについては実際の走査系と同様の設備でビーム径を測定することによりレンズ特性を検証する。

この作業は走査方向と深度方向にかなりの測定ポイントが必要となるため計測の高速化が求められている。

生産ラインでのビームプロファイラは一つにはコリメータ調整工程であり、半導体レーザーにコリメータレンズを取り付けて焦点及び芯出し調整を行う。

通常は調整後、紫外線硬化接着剤で固定されるので、タクトの短縮から応答の速いビームプロファイラが求められる。

もう一つビームプロファイラが使用される工程は、LSU（レーザスキャンユニット）の最終検査工程である。こちらはポリゴンスキャナーを回転させて、走査のジッタ、副走査の変動やトリガ信号を検査する動的な検査と、ポリゴンスキャナーを停止させてビームプロファイラによって各走査位置でのビーム径とディストーションを検査する静的な検査が行われている。

この検査工程ではポリゴンミラーをブランジャーなどによって外部から所定角度に回転し、相当する走査位置にビームプロファイラのヘッドをステージで移動して測定する方法で行われている。

こちらも測定ポイントが増えれば検査時間がかかるのと、数万回転に達している精密な空気動圧軸受やオイル動圧軸受のポリゴンスキャナーを停止状態で強制的に回転させることによる信頼性の問題からもダイナミックな測定が求められている。

3. 光MEMSスキャナーでのビームプロファイラ

レーザープリンタ、レーザーディスプレイで光MEMSスキャナーが使用され始めているが、従来のポリゴンスキャナーやガルバノスキャナーではミラー自身の剛性は高く、よほどの高回転で無い限りは停止している状態と動作している状態でのミラーの平面度は大きく変わらなかった。

MEMS (Micro Electro Mechanical System) のスキャ

0917-026X/09/¥500/論文/JCLS

ナーは半導体プロセスで製造され、通常は共振型によって超小型、省電力で機械スキャナーとしては長寿命という特性を持っている（写真1）。

ただ非常に薄いミラーをディスプレイ用では数10 kHzという高速で振動させるため平面度の維持が問題となるがこれの検証の手段が確立されていない。

一つの方法としてダイナミックな状態でのビームプロファイラを計測することにより平面度を推測することが行われている。

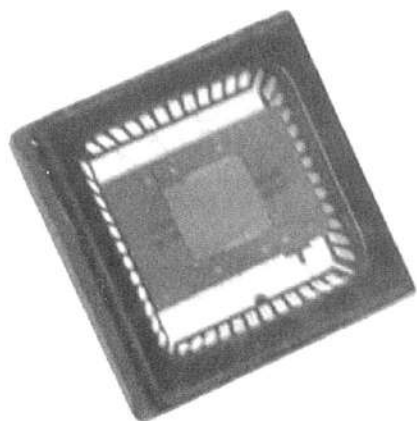


写真1 OPUS社のMEMSスキャナー

4. ダイナミック測定の問題点

ダイナミック測定に影響を与える要素としてはスキャンの変動とレーザーの点灯方法である。スキャンの変動については主にスキャナーのジッタによる主走査方向の変動、スキャナーの面倒れなどに起因する副走査方向の変動とポリゴンスキャナーの面毎の反射率によるパワー変動である。

LSUとしての評価では近年印字速度が上がっているため走査速度は数1,000 m/sに達し、ビデオクロック周波数も100 MHzを超えるものが出てきている。

ただビームパワーは1 mW以下となるものが多く、カメラタイプではCCDが高感度ではあるが1ドットで画像を得ることは難しく、通常では複数スキャンから感度を稼ぐが、その際に前述の変動によってスポットが滲むことで正確なビーム径を得ることができなくなっている。

またビデオクロック周波数が高くなることによってレーザーON/OFF時の光出力立上り、立下り特性も影響して、こちらのばらつきも主走査方向ビーム径の変動となる。カメラタイプで測定精度を上げるためには画像処理やデータ補正に工夫が必要である⁽²⁾。

5. ダイナビーム*による計測

当社ではスリット方式でのビームプロファイラを開発、販売（写真2）しているが、この測定原理は図1のように走査ビームを複数の方向からスリットで切り出し合成するものである。レーザーは連続点灯でビーム検出センサの直近に走査速度を測るセンサが配置されており、測定毎に走査速度を計っている。

主な仕様は表1の通りである。

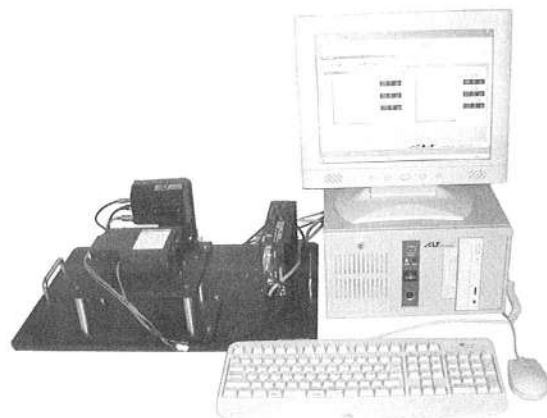


写真2 ダイナビーム

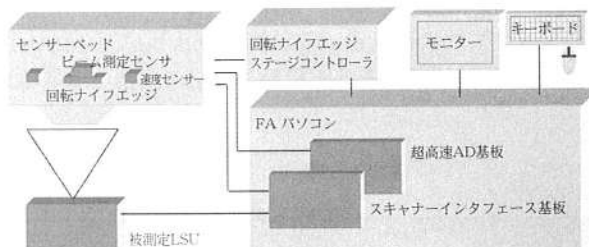


図1 測定原理

表1 主な仕様

測定範囲	40～200 μm
測定分解能	0.5 μm
ビーム速度	1,000 m/s以下
走査周波数	2～10 kHz
受光パワー	0.2～0.3 mW
測定波長	600～800 nm
計測時間	約25 s

* “ダイナビーム” はエーエルティー株式会社の登録商標です。

このシステムの問題点としては高速のA/Dが必要なことで現状最大5 GS/sのサンプルレートとなっている。また測定値は平均値でリアルタイムの測定は難しい。

6. おわりに：今後の展開

産業界で使用されるビームプロファイラは前述のような制限から用途によって価格、スペックから選択されていくものと思われる。

当社ではその中の新しい選択肢としてラインPINフォトダイオードとラインCCDを組み合わせたハイブリッド構成のスーパーダイナビームを開発中である（写真3）。

センサは20 mmピッチで最大16個の300 mm幅を2 kHzで連続データの取り込みが可能である。

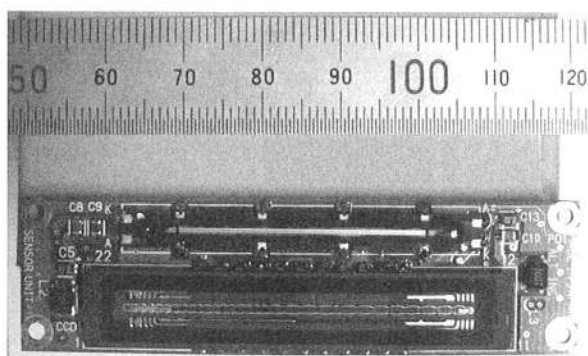


写真3 スーパーダイナビーム

専用のUSB2.0による高速データ転送でLSU検査においては10秒以下のタクト時間を実現し、 $f\theta$ レンズ検査においてもその高速性を発揮できるものと期待している。

＜参考文献＞

- (1) 中野哲寿：“高性能デジタルカメラ対応型ビームプロファイラ”、光アライアンス、2008年1月号
- (2) 吉川浩史・他：“動的ビームプロファイル測定技術”、リコーテクニカルレポート、No.27

【筆者紹介】

高野 裕
エーエルティー株式会社 代表取締役
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL：03-5946-7336 FAX：03-5946-7316

17技術誌

ネット書店

最新目次

バックナンバー

日本工業出版WEB

<http://www.nikko-pb.co.jp/>

立ち読み

日工塾

WEB講座

ベンダーズリスト

ニュース

セミナー

ご意見・ご要望・お問い合わせは
ご購入・ご注文は

info@nikko-pb.co.jp
netsale@nikko-pb.co.jp

日本工業出版

検索

MEMSスキャナの測定 ＝簡易光学振り角測定方法＝

エーエルティイー(株) 井上 裕幸

1. はじめに

7月末に、マイクロマシン/MEMS展が開催された。

最近雑誌等で目にするようになったMEMSであるが、どのような物なのかをご紹介します。

MEMSとは、Micro Electro Mechanical Systemの略で、機械部品と電子回路を一体化した小さなデバイスを意味する。

微細加工ができる為、主に半導体の製造プロセスで作られている。

機械部品と電子回路が一体化されて小型化が可能で、圧力センサ、加速度センサ、DMDなどが実用化されている。

その他にも、さまざまな分野でMEMSを応用した研究がされている。

1-1 センサMEMS

センサはその検出原理から以下のように分類され応用されている。

- (1) 抵抗線歪みゲージ方式… 広範囲の応力計測
- (2) ピエゾ抵抗効果… 圧力センサや加速度センサ
- (3) ピエゾ圧電効果… マイクロフォン
- (4) 静電容量変化… マイクロジャイロ
- (5) 振動数変化… ガスセンサや高感度圧力センサ

この分野での実用化の代表として、車載用の加速度センサが挙げられる。

ご存知のようにエアバッグ用、ABS(Antilock Blaking System)、VSC (Vehicle Stability Control System) に使用されている。

その構造は、シリコン基板の一部をアルカリ溶液でエッチングすることで周辺より薄く形成された微小な梁と、慣性マスを形成し、その4つの梁の上に歪みゲージとな

るピエゾ抵抗を形成したものである。最近では容量式センサが実用化され更に小型化され高機能になってきている。更にエンジン制御に、圧力センサ、エアフローセンサ、温度センサが利用されている。

1-2 Power MEMS

この分野では、エンジンと発電機を小型集積化して小型高出力電源を実現しようとマイクロヒートエンジンの実用化が期待されている。

- (1) MEMSロータリーエンジン… シリコンのDRIE (イオンエッチング) 加工を基本
- (2) MEMSレシプロエンジン… シリコンのDRIE加工/感光性ガラスを用いたフォト

プロセスを基本また携帯通信端末・携帯電子機器用(携帯電話・ノートPC)のマイクロ燃料電池の実用化を進めている。

- (1) 固体高分子型燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell)
- (2) ダイレクトメタノール燃料電池 (DMFC: Direct Methanol Fuel Cell)

1-3 バイオMEMS

この分野は大きく2つに分類されている。

- (1) μ -TAS研究… 従来の生化学をマイクロ化
- (2) バイオテクノロジー研究… 単一分子解析

代表されるのに、走査型プローブ顕微鏡の探針に使用されるマイクロピンセット (DNAナノピンセット) がある。

1-4 MEMSスキャナ

この分野で代表されるのは、可動ミラーの下にメモリーとロジック回路を形成しているDMD (Digital Micro Mirror Device) がある。

- (1) 光通信MEMS… 光スイッチ/光通信モジュール
- (2) ディスプレイMEMS… DMD (プロジェクタ)

その他光ディスク分野では、MEMSアクチュエータを用いた近接場光MEMSが期待されている。

2. MEMSスキャナの応用例

当社にご承知のようにレーザービームプロファイラの専門メーカーとしてユーザのお手伝いをさせていただいているが、従来のポリゴンスキャナやガルバノスキャナと違い、小型化、長寿命、低消費電力、またローコストが期待できるMEMS形レゾナントスキャナを使用した商品に期待をしている。

現在、MEMSスキャナの応用例として

- ・ヘッドアップディスプレイ
- ・プロジェクタ
- ・レーザープリンタ
- ・バーコードリーダー
- ・レーザー走査顕微鏡
- ・レーザー距離計
- ・エリアセンサ

などが考えられている。

実際に、バーコードリーダーやレーザープリンタが、小型、長寿命、低消費電力、低騒音などの特徴をいかして実用化されている。

弊社のメールマガジン (No.43) によると

「現在、米国レックスマーク社からレーザープリンタ業界初のMEMSスキャナ搭載プリンタが販売されている。E250D、E350D、E450DNでMEMSスキャナを採用する事で低騒音化、低消費電力化が可能となっている。また半導体製造技術を応用して作られるため量産性に優れておりコスト的にも大変有利である。スキャナはテキサスインスツルメンツ (TI) 製で、TIは従来からプロジェクタ用のDMDを手がけていたが、プリンタ用は初めてである。現状レゾナントタイプのMEMSスキャナは電磁方式でムービングコイルのタイプが日本信号やオリンパスから発表されているが、静電方式ではOPUS (台湾) が発表しているが、他社でも実用化に向け研究されている。TIの光学スキャナは1×4mmのミラーを2KHzで共振させる電磁方式ムービングマグネットタイプで、双方向スキャンよりポリゴンスキャナでは6面ミラーで40,000rpmに相当する。レンズは2枚構成のアーチサインレンズで従来1つだったビーム検出センサが2個配置され、時間間隔を測定することにより共振点のずれを補正していると思われる。特許を見ると2004年の8月には今販売されていると同様のモデルができていたと思われるので驚きである。今後MEMSスキャナはポリゴンスキャナに代わってレーザープリンタやバーコードリーダーの中でも大きな割合を占めていくものと考えられる。

弊社では、LSUの測定装置を製作していた経緯もあり、MEMSスキャナの測定装置を検討していた。LSUとは、Laser Scanning Unitの略でレーザープリンタの主要部品の一つである。

MEMSスキャナにおいて、重要な特性は、ウォブル、ジッタ、共振周波数、光学振り角、ミラーの動的平面度変化である。

ウォブルとは、ポリゴンスキャナでいう面割れ量のこと、走査位置のバラツキ量である。ジッタとは、ある2ポイント間のレーザー走査時間のバラツキ量である。

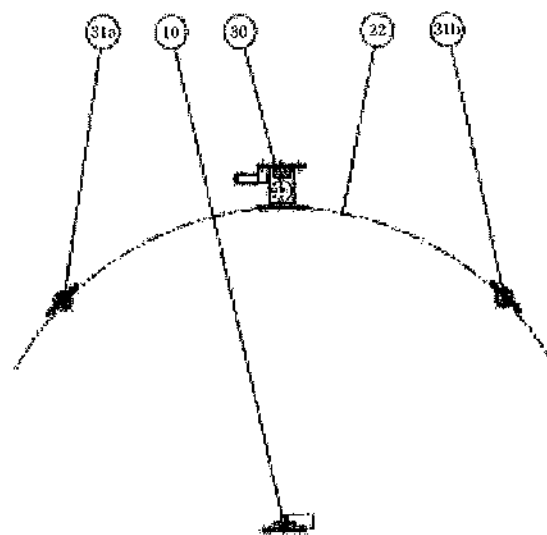
今回は、ウォブル、ジッタ、共振周波数、光学振り角を測定する装置において、光学振り角を高速かつ簡素化した構成で測定する方法を提案する。

3. MEMSスキャナ測定装置における簡易光学振り角測定方法

図1 (センサ配置図) のように、MEMSスキャナにより走査されたレーザー光を距離Lの位置に設置したジッタセンサで受光する。

MEMSスキャナの走査速度は、半径Lの位置での円弧上をほぼ正弦波で変化するので、それを半径Rの等速円運動と仮定して、それぞれの時間から、光学振り角を計算する。

この時、MEMSスキャナの動作周波数fと等速円運動の角速度 ω は、 $\omega = 2\pi f$ の関係がある。



10: MEMSスキャナ
20: 光路
30: ウォブルセンサ
31a: ジッタセンサ1
31b: ジッタセンサ2

図1 センサ配置図

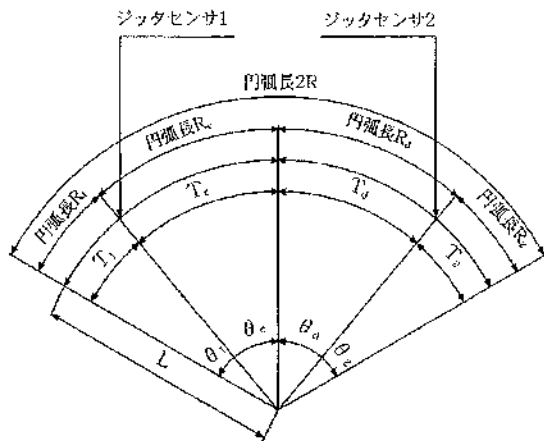


図2 光学振り角計算1

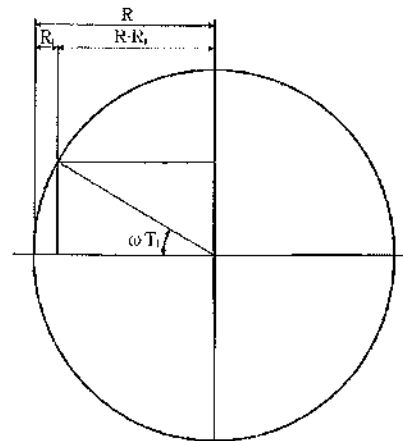


図3 光学振り角計算2

図2（光学振り角計算1）より円弧の長さR1は、
 $R_1 = 2\pi L \times (\theta_1 / 360)$ …(1)
 となる。

同様に、図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ2Rは、

$$2R = 2\pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$

$$R = \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$
 …(2)

図2（光学振り角計算1）の円弧長2Rを直径とする円周上を等速運動すると仮定するので、図3（光学振り角計算2）のように定義する。

図3（光学振り角計算2）より余弦の長さR - R2は、
 $R - R_2 = R \cos(\omega T_1)$
 $R_2 = R - R \cos(2\pi f T_1)$ …(3)
 $= \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} \times R$

(3)式に(1)式と(2)式を代入すると、

$$2\pi L \times (\theta_1 / 360) = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} \times \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$

$$2\theta_1 = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d)$$

これを整理すると、

$$\theta_1 = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_1)\} \times (\theta_2 + \theta_c + \theta_d)$$

ここで、

$A = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_1)\}$ と仮定すると

$$\theta_1 = A \times (\theta_2 + \theta_c + \theta_d)$$
 …(4)

前記と同様にR2について計算する。

図2（光学振り角計算1）より円弧の長さR2は、
 $R_2 = 2\pi L \times (\theta_2 / 360)$ …(5)
 となる。

同様に、図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ2Rは、

$$2R = 2\pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$

$$R = \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$$
 …(2)

図2（光学振り角計算1）の円弧長2Rを直径とする円周上を等速運動すると仮定するので、図3（光学振り角計算2）のように定義する。

図3（光学振り角計算2）より余弦の長さR - R2は、
 $R - R_2 = R \cos(\omega T_2)$
 $R_2 = R - R \cos(2\pi f T_2)$ …(6)
 $= \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} \times R$

(6)式に(5)式と(2)式を代入すると、
 $2\pi L \times (\theta_2 / 360) = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} \times \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360$
 $2\theta_2 = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d)$

これを整理すると、

$$\theta_2 = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_2)\} \times (\theta_1 + \theta_c + \theta_d)$$

ここで、

$B = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_2)\}$ と仮定すると

$$\theta_2 = B \times (\theta_1 + \theta_c + \theta_d)$$
 …(7)

(4)式に(7)式を代入すると、

$$\theta_1 = A \times (\theta_2 + \theta_c + \theta_d)$$
 …(4)
 $= A \times \{B \times (\theta_1 + \theta_c + \theta_d) + \theta_c + \theta_d\}$
 $= AB\theta_1 + A(1+B)(\theta_c + \theta_d)$

ゆえに

$$\theta_1 = A(1+B)(\theta_c + \theta_d) / (1-AB)$$
 …(8)

但し、

$$A = \{1 - \cos(2\pi f T_1)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_1)\}$$

$$B = \{1 - \cos(2\pi f T_2)\} / \{1 + \cos(2\pi f T_2)\}$$

これにより、(8)式に時間T1とT2を代入すれば、theta1が求まる。

また、(7)式に時間T1、T2とtheta1を代入すれば、theta2が求まる。

最終的に、図2（光学振り角計算1）において左右の光学振り角は、

左側の光学振り角 $=\theta_1+\theta_c$

右側の光学振り角 $=\theta_2+\theta_d$

と計算できる。

また、実測時間が妥当であるか確認する為にジッタセンサ間の時間を計算する。

図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ R_1 は、

$$R_1=2\pi L\times(\theta_1/360) \quad \dots(1)$$

となる。

同様に、図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ $2R$ は、

$$2R=2\pi L\times(\theta_1+\theta_2+\theta_c+\theta_d)/360 \quad \dots(2)$$

$$R=\pi L\times(\theta_1+\theta_2+\theta_c+\theta_d)/360$$

図3（光学振り角計算2）より余弦の長さ $R-R_1$ は、

$$R-R_1=R\cos(\omega T_1)$$

$$\cos(2\pi f T_1)=\{(R-R_1)/R\}$$

$$2\pi f T_1=\cos^{-1}\{(R-R_1)/R\}$$

ゆえに

$$T_1=1/2\pi f\times\cos^{-1}\{(R-R_1)/R\} \quad \dots(9)$$

ただし、 R と R_1 は、(1)式と(2)式を満たす。

前記と同様に R_2 について計算する。

図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ R_2 は、

$$R_2=2\pi L\times(\theta_2/360) \quad \dots(5)$$

図3（光学振り角計算2）より余弦の長さ $R-R_2$ は、

$$R-R_2=R\cos(\omega T_2)$$

$$\cos(2\pi f T_2)=\{(R-R_2)/R\}$$

$$2\pi f T_2=\cos^{-1}\{(R-R_2)/R\}$$

ゆえに

$$T_2=1/2\pi f\times\cos^{-1}\{(R-R_2)/R\} \quad \dots(10)$$

ただし、 R と R_2 は、(2)式と(5)式を満たす。

MEMSスキャナによって走査されるレーザー光の一周期は、

$$1/f=2\times(T_1+T_c+T_d+T_2)$$

ゆえに

$$T_c+T_d=1/2f-(T_1+T_2) \quad \dots(11)$$

これにより、(11)式に時間 θ_1 、 θ_c 、 θ_d 、 θ_2 を代入すれば、ジッタセンサ間の時間 T_c+T_d が求まる。

さらに、図3（光学振り角計算2）より走査速度を計算する。

等速円運動と仮定しているので、

$$V=R\omega\times\sin(\omega T)$$

最高走査速度 V_{max} は $\omega T=90^\circ$ なので、

$$V_{max}=R_2\pi f \quad \dots(12)$$

ジッタセンサ1位置での走査速度 V_1 は、

$$V_1=R_2\pi f\times\sin(2\pi f T_1) \quad \dots(13)$$

ジッタセンサ2位置での走査速度 V_2 は、

$$V_2=R_2\pi f\times\sin(2\pi f T_2) \quad \dots(14)$$

4. 測定結果

光学振り角を正確に測定するのは困難であるが、目視と今回の計算での測定値を比較する。

今回使用するMEMSスキャナは、OPUS社製のBA0050とする。

BA0050は、実際の動作周波数の2倍の周波数を入力するのだが、ここでは、動作している周波数を表示する。

ジッタセンサの位置は、 $+15^\circ$ と -15° 、光学振り角が 1° づつ変化するように周波数を変化させる。その時の光学振り角を前記測定方法で測定し、次に目視で角度を読みとる。

測定系は、図4（ブロック図）のような構成とし、ジッタセンサに浜松ホトニクス社製S9684、任意波形発生器にエヌエフ回路設計ブロック社製のDF1906、時間測定に弊社製TIAボードALT-9441を使用する。

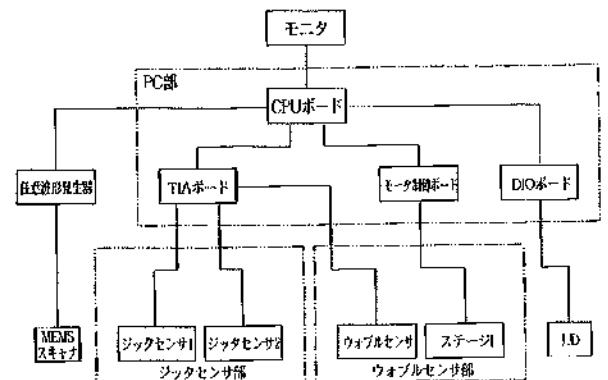


図4 ブロック図

光学振り角の測定結果を図5（光学振り角特性）に示す。前記測定方法で測定した光学振り角値と目視で角度を読みとった光学振り角値は、一致することが分かる。

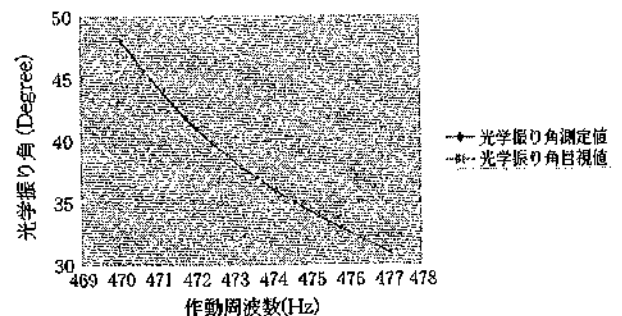


図5 光学振り角特性

また、2点間時間の測定結果を図6（2点間時間特性）に示す。

同じ測定系で測定した2点間時間と前記計算式から求めた2点間時間は、一致することが分かる。

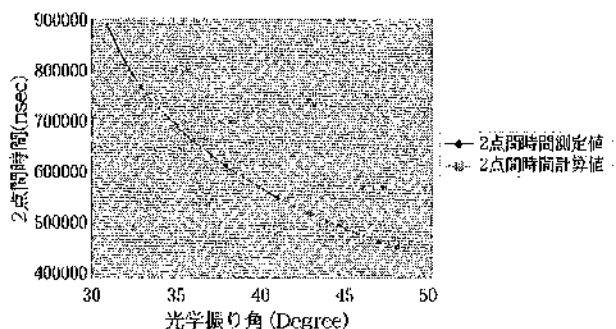


図6 2点間時間特性

ジッタセンサの位置が光学振り角の端に近いほど走査速度が遅くなるので、測定値と計算値に誤差があると予想されるのだが、今回の実験では、MEMSスキャナの動作周波数が低いものの、光学振り角31°に対してジッタセンサの位置が約97%である30°（+15°と-15°）と測定限界の位置まで、この測定方法が有効であると分かった。

5. おわりに

以上で、ウォブル、ジッタ、共振周波数、光学振り角を測定する装置において、光学振り角を高速かつ簡素化した構成で測定する方法を提案した。

以前は、ジッタセンサを電動ステージで移動させ、ジッタセンサ信号の有無によってジッタセンサの位置を確定し、その位置から光学振り角を計算していた。

この測定方法を採用することで、ジッタセンサを固定でき、高速に最大光学振り角を検知し、その時のウォブルとジッタを測定することができる。

MEMSスキャナの動作周波数は、まだ数kHzから数100Hz程度だが、ラスタースキャン方式のディスプレイ用には主走査数十kHz以上、副走査数10Hzが要求されている。

今後のMEMSスキャナ開発の動向は、MEMSスキャナの動作周波数が広くなると予想されるので、広い周波数に対応できるかが、測定装置を開発する上で重要になる。

〈参考文献〉

- (1) 宮島博志、太田亮：光MEMSの設計・製造技術、精密工業会誌 第70巻 第9号 平成16年9月5日
- (2) ALT「メールマガジン」

【筆者紹介】

井上裕幸

エーエルティー(株) 開発部
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL:03-5946-7336 FAX:03-5946-7316

広告製品のカタログ等の資料は、本誌の「カタログ・資料請求用紙」でご請求下さい。

編集部では、到着した資料請求用紙を10日毎に処理し、広告主へお知らせします。広告主より直接読者へその資料が送られますが、お急ぎの場合は直接広告主へご連絡下さい。