



テクニカルハンドブック 光 MEMS スキャナ計測

2021年6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. 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
2. 光 MEMS スキャナの計測	光アライアンス 2012 年 1 月
3. レーザスキャンと光 MEMS スキャナ	光アライアンス 2010 年 8
4. 光 MEMS スキャナの評価・検査システム	OplusE 2010 年 5 月
5. MEMS スキャナの測定	光アライアンス 2008 年 1 月

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

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トビ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 $\phi 1$ 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トビリティーが悪化するが、この他に画像の周辺であ

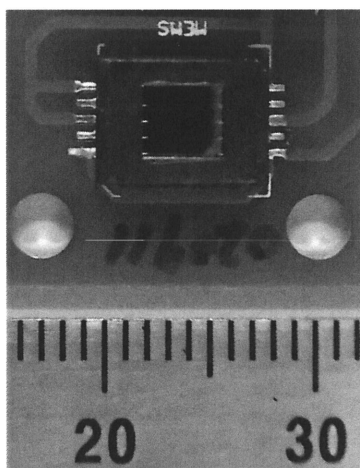


図 1

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

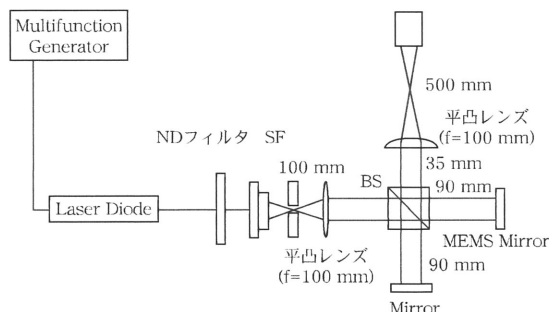


図2

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50 ns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

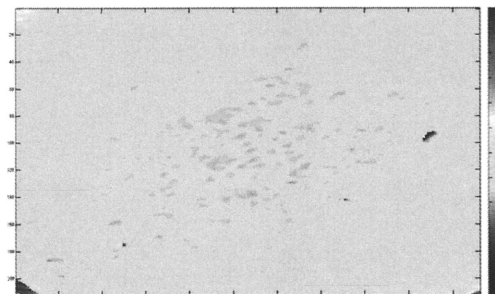


図3

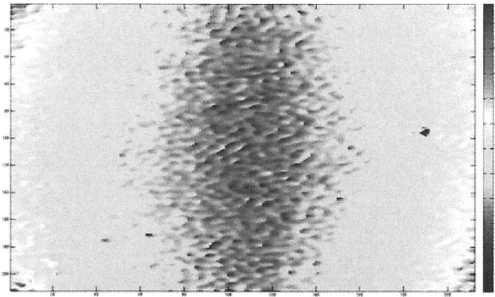


図 4

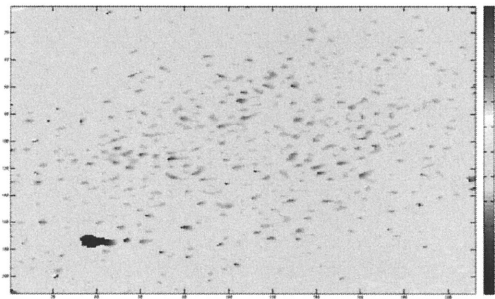


図 5

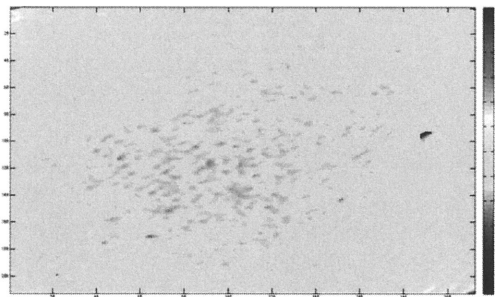


図 6

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

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＝

エーエルティー(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。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とレーザがあるがLEDは発光面積が大きく、放射角が大きいため効率が悪くなり、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のスキャン方式が優れているが、画像品質としてはスペック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円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ため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して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。

3-3 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。

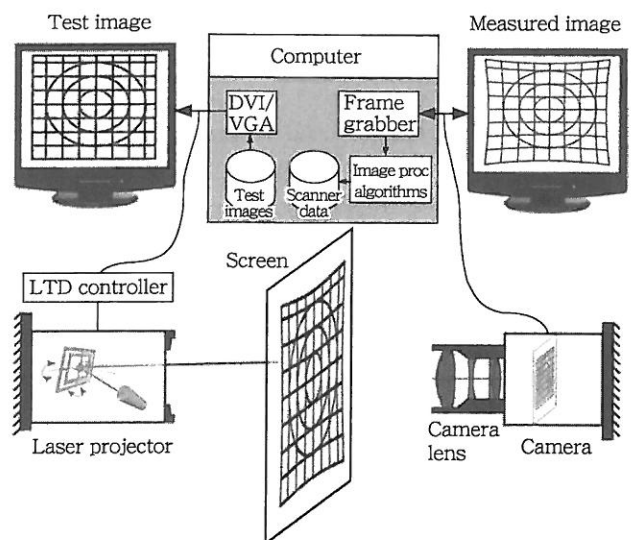


図1

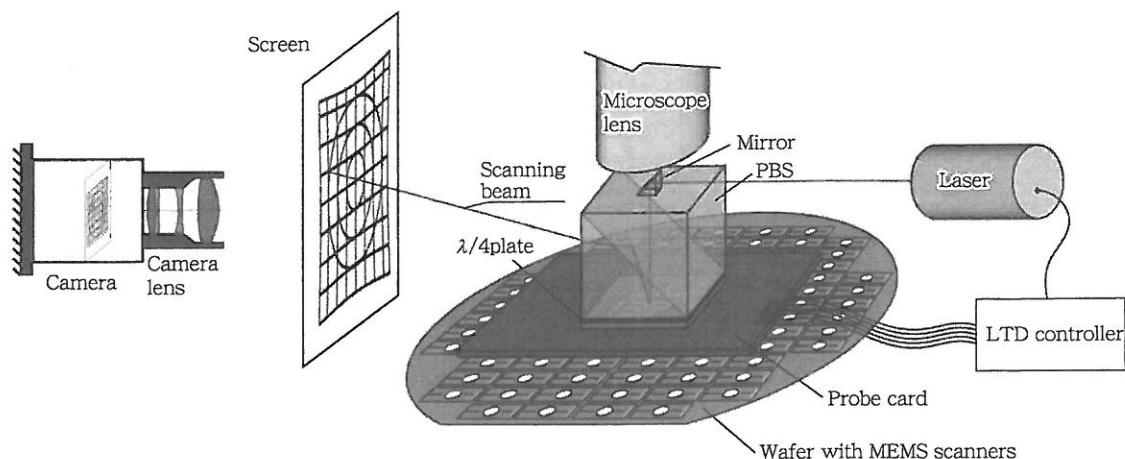


図2

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（株）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）

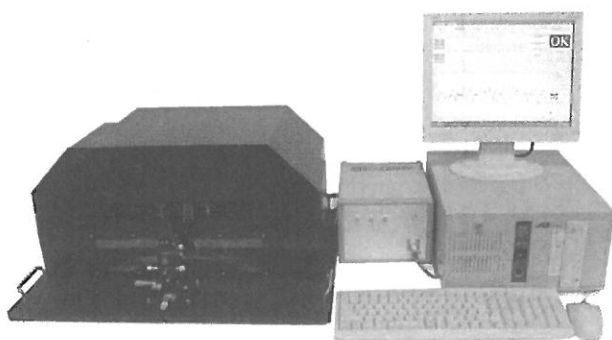


写真1

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

エーエルティー株 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。

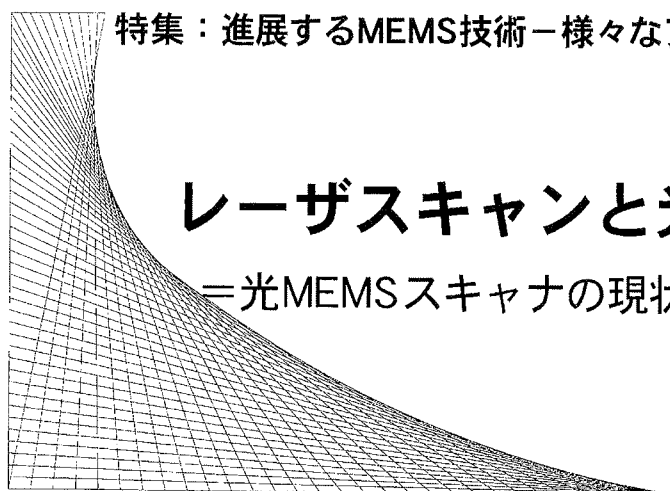
年間購読のお申し込みは フリーコール **0120-974-250**

<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＝

エーエルティー(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マーカ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。

またマイクロプレシジョン株式会社⁽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櫛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。

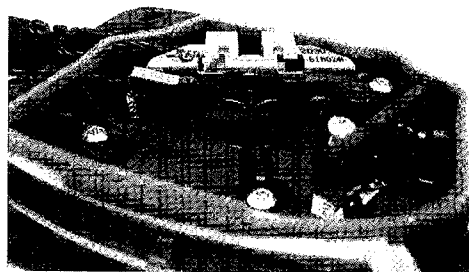


写真1 レーザプリントに搭載された光MEMSスキャナ

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スキャン方式のプロジェクタ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。

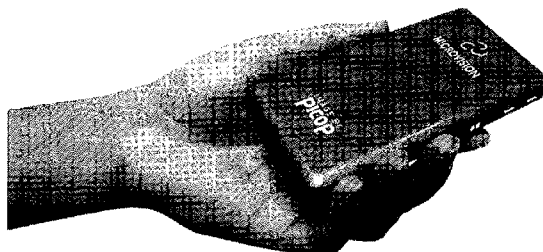


写真2 ピコプロジェクター（マイクロビジョンご提供）

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⁽⁸⁾。

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、医療、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のカラーフィルタ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⁽⁹⁾。

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、低速側ガルパ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

一次元、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フラウンホーファーから発表されている⁽¹⁰⁾。

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⁽¹¹⁾、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⁽¹²⁾。

(3) 医療用途

光MEMSスキャナの小型、省電力を生かして医療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⁽¹³⁾。

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しての評価が必要になる。

(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の走査内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。

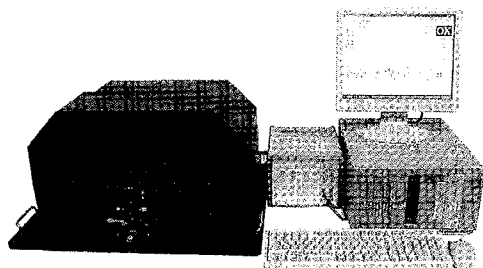


写真3 MEMS計測システム

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	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	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
	共振周波数	測定分解能：0.1 °C

エーエルティー㈱のモデルALT-9A44⁽¹⁴⁾（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⁽¹⁵⁾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.tsp?sectionId=623&tabId=2458&familyId=1744
- (5) オーバースマイクシステム：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で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)」

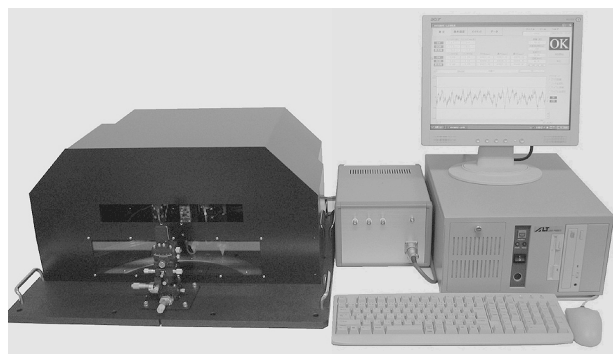


図1 光 MEMS スキャナー検査システム ALT-9A44

<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

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、

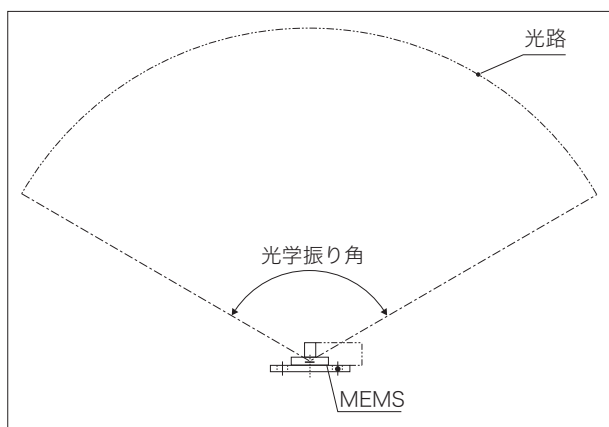


図1

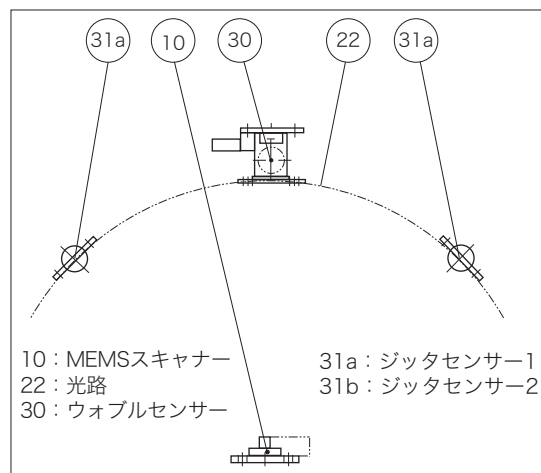


図2 センサー配置図

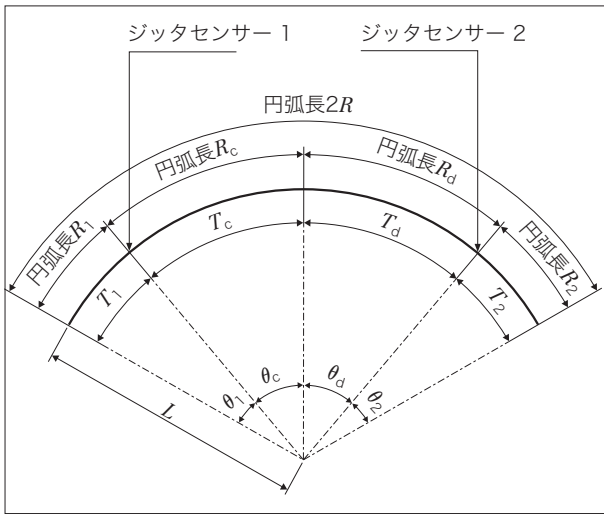


図3 光学振り角計算1

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

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。

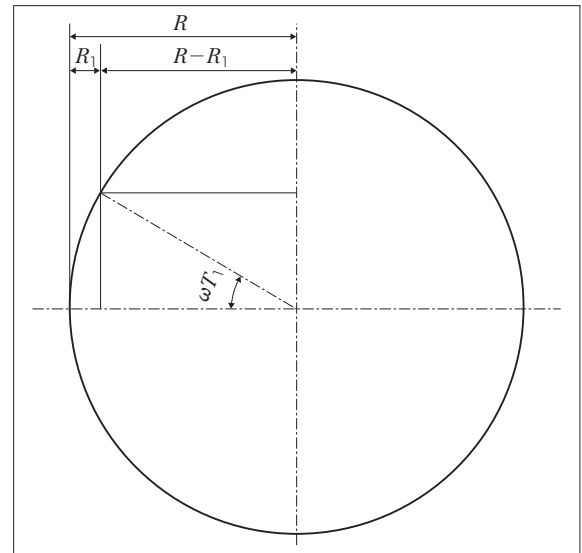


図4 光学振り角計算2

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

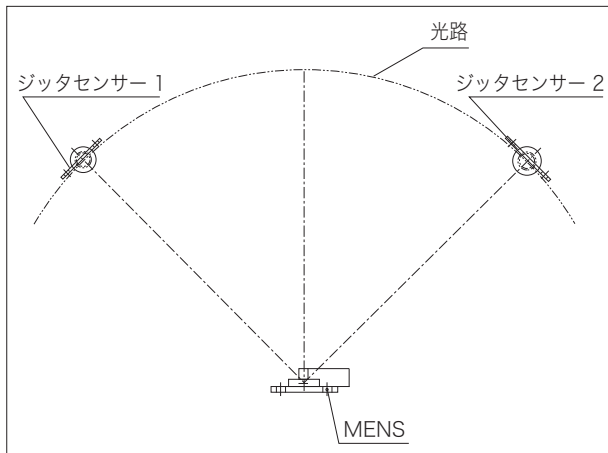


図5

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 (3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

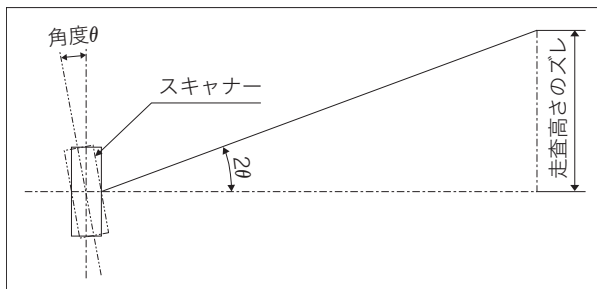


図6

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

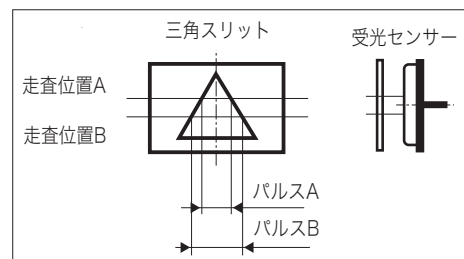


図7

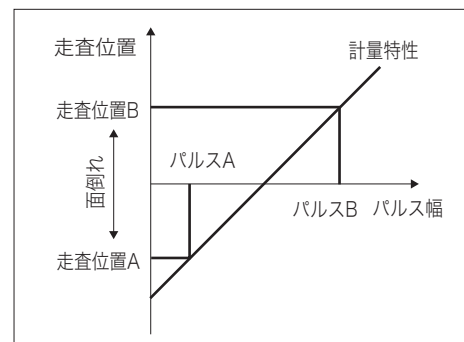


図8

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。

走査位置 = (計量特性) × (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℃ 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℃、120℃ 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㈱）：“MEMS スキャナーの測定”，光アライアンス（2007年10月）

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な為、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 Braking 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) 光通信用MEMS … 光スイッチ/光通信用モジュール
- (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

当社はご承知のようにレーザースキャン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
- ・レーザプリンタ
- ・バーコードリーダー
- ・レーザ走査顕微鏡
- ・レーザ距離計
- ・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枚構成のアーク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倒れ量のこと、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。

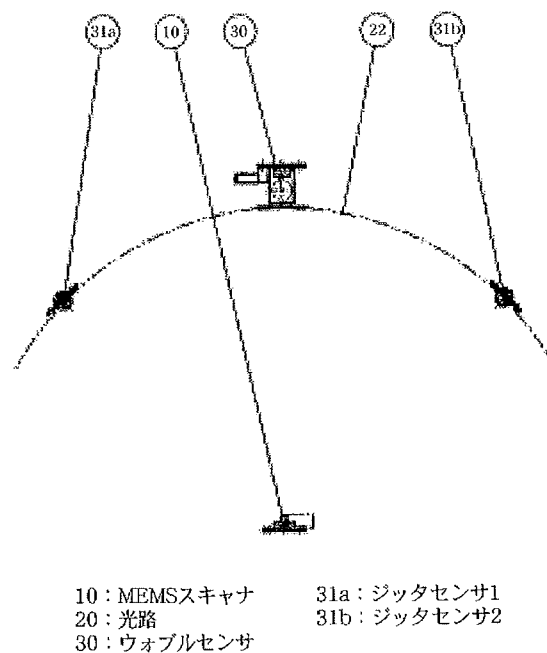


図1 センサ配置図

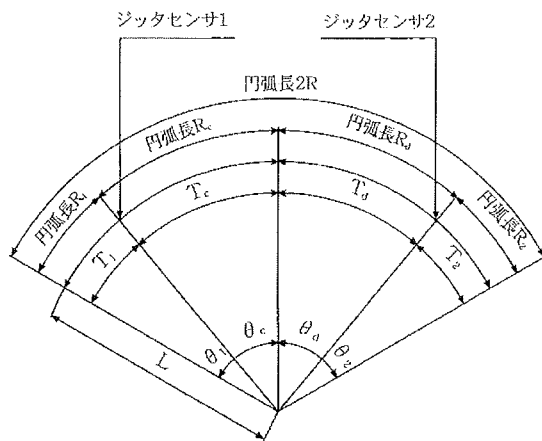


図2 光学振り角計算1

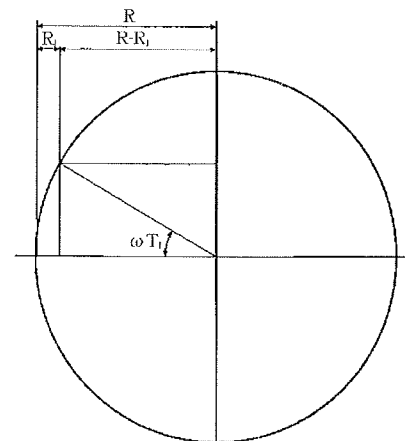


図3 光学振り角計算2

図2（光学振り角計算1）より円弧の長さ 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、

$$\begin{aligned} 2R &= 2\pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \\ R &= \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \end{aligned} \quad \dots(2)$$

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 $R - R_1$ は、

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

$$R_1 = R - R \cos(2\pi f T_1) \quad \dots(3)$$

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

(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

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

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、

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

$$\begin{aligned} 2R &= 2\pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \\ R &= \pi L \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_c + \theta_d) / 360 \end{aligned} \quad \dots(2)$$

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 $R - R_2$ は、

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

$$R_2 = R - R \cos(2\pi f T_2) \quad \dots(6)$$

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

(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、

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

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

(4)式に(7)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \theta_1 &= A \times (\theta_2 + \theta_c + \theta_d) \quad \dots(4) \\ &= A \times \{B \times (\theta_1 + \theta_c + \theta_d) + \theta_c + \theta_d\} \\ &= AB \theta_1 + A(1+B)(\theta_c + \theta_d) \end{aligned}$$

ゆえに

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

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 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、

$$\begin{aligned} 2R &= 2\pi L \times (\theta_1+\theta_2+\theta_c+\theta_d) / 360 \\ R &= \pi L \times (\theta_1+\theta_2+\theta_c+\theta_d) / 360 \end{aligned} \quad \dots(2)$$

図3（光学振り角計算2）より余弦の長さ $R-R_1$ は、

$$\begin{aligned} R-R_1 &= R \cos(\omega T_1) \\ \cos(2\pi f T_1) &= \{(R-R_1)/R\} \\ 2\pi f T_1 &= \cos^{-1} \{(R-R_1)/R\} \end{aligned}$$

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、

$$\begin{aligned} R-R_2 &= R \cos(\omega T_2) \\ \cos(2\pi f T_2) &= \{(R-R_2)/R\} \\ 2\pi f T_2 &= \cos^{-1} \{(R-R_2)/R\} \end{aligned}$$

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° ず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。

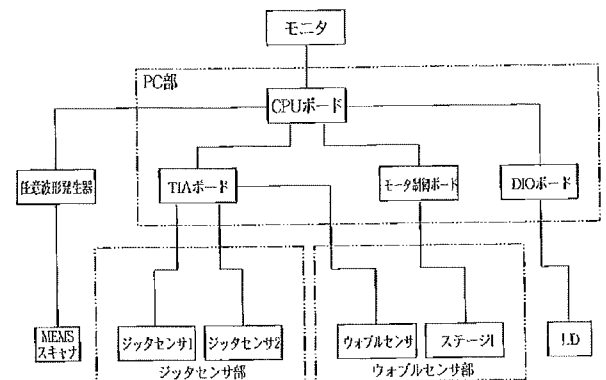


図4 ブロック図

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。

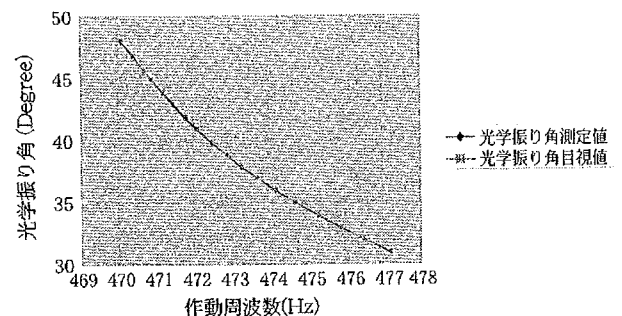


図5 光学振り角特性

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。

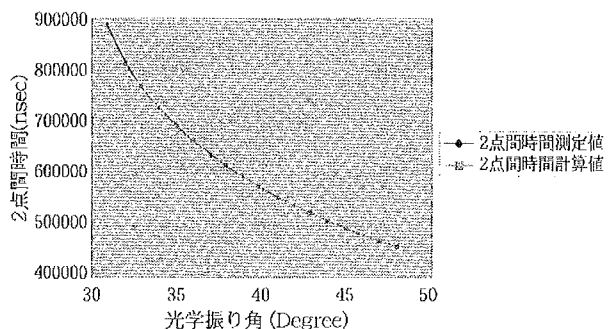


図6 2点間時間特性

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° ($+15^\circ$ 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、MEM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atalog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。