マイクロマシニング技術を用いた高速光スキャナ

High-speed Optical Scanner using Micromachining Technology

UDC 681.78

高 橋 良 文	Yoshifumi Takahashi	技術統轄本部 研究所 センサデバイス研究チーム
竹内雄二	Yuji Takeuchi	メジャメント ソリューションズ ATE 事業部 第 2 開発部プロジェクトチーム

まえがき

マイクロマシニング技術は、1980年代後半、ミクロンサ イズのモータを作れる技術としてセンセーショナルなデ ビューを飾った。10年以上経過した現在では、奇抜なアイ デアを取り入れた研究から,実用を意識した方向に研究対 象が変わってきている。とりわけ、センサ、光関係、バイ オテクノロジー、化学分析の分野は、マイクロマシン技術 との相性が良いことが広く知られるようになり実用的な研 究の活発な領域である。これらの中で最初に成功を収めた のは、加速度センサや圧力センサに代表されるセンサの分 野であった。圧力センサは、シリコンの異方性エッチング 技術を用いてダイヤフラム構造を作り、さらに信号処理用 の電子回路を同一のシリコン基板に作りこむことで、信頼 性の高い低価格のセンサを実現することができた。現在, 医療や自動車の分野で大量に使われるようになった。イン クジェットプリンターのプリンターヘッドがこれに続いた。 デジタルカメラの普及に伴いカラープリンタの需要は急激 に増えてきている。印刷の品質が向上し銀塩写真にせまる 勢いである。バイオテクノロジーの分野ではキャピラリ電 気泳動チップや DNA チップが本技術を用いて実用化され、 生物の遺伝子情報の解読に貢献している。

一方,マイクロマシニング技術の光学分野への応用は, 研究当初から最も有望であると考えられて来た。応用が可 能な分野は裾野が広く,光通信,データ記録,ディスプレ イ,光応用計測と多岐にわたる。光通信の分野ではイン ターネットの爆発的な普及による需要に応えるため, WDM 光通信システムの研究が精力的に行われている。シ ステムに用いる各種光部品にマイクロマシニング技術が導 入されている。光クロスコネクト用の光スイッチは,微小 なミラーを集積することが可能であるため,特に注目され ている。さらに,ディスプレイの分野では,十数ミクロン 角のミラーを2次元状に配置し,個々のミラーの傾きを個別にコントロールすることにより画像を表示するデバイス が開発されている。従来の液晶を用いたディスプレイに比 べ輝度が高いことが特徴であり,実用に供されている。光 応用計測へのマイクロマシニング技術の導入例としては光 エンコーダや走査型顕微鏡等への応用が研究されている。

光を走査する光スキャナは、応用範囲の広い光学部品で ある。マイクロマシニング技術を用いて光スキャナを開発 する研究^{1~2)}は活発であり、ディスプレイ、バーコード リーダ、レーザビームプリンタへの応用が研究されている。

我々は、マイクロマシニング技術を用いて高速光スキャ ナを実現し、光計測システムに応用することを検討してい る。有効性を把握するため、本光スキャナを光ファイバな どの線材の直径を計測するレーザ外径測定機に搭載し性能 を評価した。本稿では、光スキャナの設計、製作プロセス、 駆動方法、評価、さらにレーザ外径測定機への応用につい て述べる。

2 _{光スキャナの設計}

光スキャナは、レーザ外径測定機に搭載して評価するこ とを前提に設計した。そこで、光スキャナの仕様は、従来 機に組み込まれている磁気駆動タイプの音叉型光スキャナ に合わせた。表1に新しく開発すべきマイクロマシン光ス キャナの仕様を示す。

表1 マイクロマシン光スキャナの仕様 Specification for micromachined optical scanner

共振周波数	1.5kHz
走査角度 (光学的)	300mrad (17.2deg)
ミラーサイズ	6mm × 8mm
Q 值	1000以上

機械的な共振を利用するこの種の光スキャナは、走査の安 定性を向上させ、駆動エネルギーを小さくするために、Q 値を大きくしたい。そこでQ値の仕様は、従来機と同様に 1000以上に設定することとした。光スキャナのミラーサイ ズは、外径測定機の空間分解能を左右するパラメータであ る。すなわち、収束したフライングスポット径は、光ス キャナの反射光を収束するためのレンズの焦点距離に比例 し、入射ビーム径に反比例する。ここでは光スキャナの反 射ビーム径を考慮し6mm×8mmにした。共振周波数は、 従来機の信号処理系に合わせ1.5kHzにし、走査角度は、実 装時の光学系に合わせるため、300mrad(17.2deg)にした。

光スキャナの寸法は設定した仕様を基に有限要素法シ ミュレータと試作で決定した。図1に設計したマイクロマ シン光スキャナの基本的な構成を示す。



図1 光スキャナの構成 Structure of optical scanner

光スキャナは,音叉型光スキャナと同様に磁気で駆動する ことにした。光スキャナは、ミラー(6mm × 8mm)を2 つの梁で支える機械的な共振子の構造であり、シリコン基 板をエッチングし一体成型することにより構成した。

ミラーの裏面には、磁気駆動用の厚み 100 μ m のパーマ ロイを埋め込んだ。埋め込み用の穴は、シリコンをエッチ ングして作製する。パーマロイ埋め込み用にミラー裏面に 設けた穴には次の3つの目的がある。

- パーマロイの高さとミラー面を一致させ、空気抵抗 を低減する。
- (2) パーマロイをミラー裏面に接着する位置精度を向上 する。
- (3) ミラーの質量を減少させ、駆動エネルギーを低減する。

第1の目的に対しては、空気抵抗の減少に伴いQ値の向 上が可能となり結果としてスキャナの駆動エネルギーの低 減が期待できる。第2の目的に対しては、決まった位置に パーマロイを設けることにより、実際の生産時に共振周波 数の精度を向上させることができ, さらに, 共振周波数の バラツキを減少させることが期待できる。第3の目的に対 しては、ミラーの重さと梁のバネ定数が関係している。す なわち,スキャナの共振周波数は、ミラーの重さと梁のバ ネ定数で決定されるが、ミラーの質量が減少するとバネ定 数を小さくできる。バネ定数が小さくなると駆動力が小さ くなり結果的に消費電力が少ない光スキャナを実現するこ とが可能になる。ミラー表面には反射率を向上させるため に、Cr/Auを蒸着する。なお、Crは、Auの密着を良くす る目的で蒸着している。また、ミラーで走査するレーザ光 のスポットは楕円形なのでミラーの端は丸くして質量をで きるだけ小さくする形状にした。共振子のフレーム上には、 ミラー面の保護とフレームを強化する目的でスペーサを設 けた。共振子とフレームの接合、および、共振子とパーマ ロイの接合は、エポキシ接着剤を用いることにした。

共振子の寸法設計には,有限要素法シミュレータを用いた。図2に共振周波数シミュレーションの1例を示す。



図 2 共振周波数のシミュレーション Simulation for resonant frequency analysis

このシミュレーションにより、ミラーの回転往復運動を1 次モードにするための梁の形状を求めることができる。シ リコン基板は結晶方位<100>、厚み200 μ mの基板を用 いることにした。この例は、幅200 μ m、長さ1.7mmの梁 を用い、さらに、2mm×2mm×0.1mmのパーマロイ板 を用いると、仕様である1.5kHzの共振周波数を満足するこ とを示している。これらの結果を基に複数の形状を設計し 実験により最終形状を決定することにした。



図 3 光スキャナの応力解析 Stress analysis for optical scanner

図3は、光スキャナの偏向可能な角度を知るために行った 応力解析シミュレーションである。梁が破壊する角度を把 握することにより、仕様を満足できるか見極めが可能にな る。具体的には、ミラーの端に変位を与え、その時に梁に 加わる応力の分布の変化を観察している。仕様では、 300mrad(17.2deg)の角度変化が必要であるが、このとき の最大応力は 0.39GPa であった。シリコン単結晶の破壊応 力は 10GPa 程度であり、300mrad の場合の応力は、破壊応 力の 3.9 %と小さく実用的であることが分かった。また、 600mrad の場合、最大応力は、0.99GPa であり応力の集中 が大きくなり破壊の危険性が高くなる。ミラーとフレーム を繋ぐ梁の両端は、応力が集中する。破壊を防ぐために湾 曲部を設けることにし、湾曲部の半径は実験で決めた。

3 製作プロセスと組み立て

図4に共振子の製作プロセスを示す。始めに用いる材料 は、厚さ200 µm、両面研磨のSi基板<100 >面である。 ①この基板の両面にAlを蒸着する。②続いて表面のアル ミをフォトリソグラフィー技術を用いてパターニングし、 ③さらに裏面のアルミを同様にパターニングする。次にこ のアルミのパターンをマスクにしてICP - RIE 装置を用い てSi基板をエッチングする。ICP - RIE 装置は、Si基板 を垂直に深くエッチングするドライエッチング装置である。 エッチングレートは1.5 µm/min 程度である。④ Si 基板 のエッチングは、最初に裏面を行いパーマロイ用の穴を形 成し、⑤続いて表面からのエッチングを行い共振子の形状 を形成する。ICP - RIE 用のマスクは、Al 以外に SiO2 が 利用できるが、これまでの実績から今回はAl を用いた。



図4 シリコン共振子の製作プロセスのフロー Process flow of Si resonator

⑥エッチングが終了するとマスクに用いた Al を除去し、
⑦最後に反射率を向上させるため Cr と Au を蒸着した。Si スペーサも共振子とほぼ同等のプロセスを用いた。相違点は、表面からの ICP - RIE を用いた Si 基板のエッチングが1回のみである点である。磁気駆動に用いるパーマロイは、0.1mm 厚の板をダイサーで切断し製作した。
図5に完成したスキャナを示す。



図 5 完成した光スキャナ Final optical scanner

光スキャナの組立には、エポキシ接着を用いた。まず、ス ペーサと共振子を接着し、続いてパーマロイを光スキャナ に接着する。パーマロイのサイズは、実際の磁気駆動実験 を行い 2mm × 2mm × 0.1mm に決定した。また、フレー ムとミラー部を繋ぐ梁の両端の湾曲部の半径は 400 μ m に 決定した。

なお,最終的な光スキャナの形状を決める過程において, 複数の異なるタイプの光スキャナを試作し評価した。ここ では図6に2つの例を紹介する。タイプAは,Q値の改 善を目的に試作した。ミラーとミラーを囲むように配置し たリング状の構造物と4本の梁で構成される。ミラーの大 きさは6mm×8mmであり,全体の大きさは,20mm× 20mmである。



タイプ A

タイプ B

図 6 試作した光スキャナの例 Examples of evaluated optical scanner

リング状の構造物とミラーが逆位相で振動するモードを 選択するとQ値が高くなることが知られており,実際の測 定では,1500以上の値が得られた。しかしながら,梁の捩 れが最終形の光スキャナの2倍になり破壊が起き易くなる ため偏向角が大きく取れない。実際の測定では,約 300mradで破壊した。

タイプBは、ミラーの質量を減らすため125 μ m 角深 さ175 μ m の穴をあけた構造である。質量を減少できると 梁のバネ定数を小さくすることができる。この結果として 小さな力で駆動が可能になる。この結果、消費電力の小さ い光スキャナを実現できる。しかし、実際の素子では、ミ ラーが変形し、光スキャナで走査した光が変形する問題が 発生した。特に梁の近傍での変形が大きいことがわかった。 これを改善するには、梁近傍の穴の大きさを小さくするな どが考えられるが、今回は改良を行わなかった。これら複 数のタイプのスキャナを評価した後に、最終形状の光ス キャナを選択した。

+ 光スキャナの駆動

光スキャナを駆動するための電磁石は、磁界解析シミュ レータを用いて設計した。図7に磁界解析の1例を示す。





C 型コアの磁束

C型コアの磁束(拡大図)



パーマロイに働く力の解析



光スキャナのミラー裏面に接着した板状のパーマロイは, 板の面方向に磁化される。この板を効率良く引っ張るには, 板の幅に近いギャップのコアを有するC型の電磁石が有効 であることが分かった。シミュレーション結果から分かる ように,電磁力は,パーマロイの端で強く発生する。シ ミュレーション結果を基に,駆動用の電磁石を設計した。 電磁石のギャップの幅は,約2mmである。図8に設計し た電磁石の形状を示す。コアは,パーマロイの板を積層し た構造である。



図8 電磁石の形状 Photograph of electromagnet



図 9 電磁石を搭載した光スキャナ Micromachined optical scanner equipped electromagnet

次に,電磁石と光スキャナを一体化した形状を図9に示 す。電磁石と光スキャナは,両者を固定するための真鍮の 台に設置されている。電磁石は,ネジを用いて固定してい る。光スキャナは,エポキシ接着剤を用いて真鍮の台に直 接接着している。電磁石と光スキャナの位置の微調整は, ネジを締める位置を変えることで行える。

5 光スキャナの評価

光スキャナの評価は、図10に示す測定系を用いた。測 定系は、光源であるレーザダイオード、光スキャナ、信号 発生器、スクリーンで構成されている。レーザダイオード の光は、光スキャナのミラーに反射されスクリーンに投影 される。信号発生器の信号を光スキャナの機械的な共振周 波数に合わせると光スキャナが振動を始める。この結果、 走査された光がスクリーンに投影される。光スキャナの評価は,スクリーンに投影された光を観察する方法で行った。 ミラーの変形が生じている場合は,偏向光に変化が現れる。 ミラーの変形量を把握するため,レーザビームを小さく絞り,ミラー面上を移動させる方法を用いた。Q値の評価は, 信号発生器の周波数を変化させ,偏向光の偏向幅を観測す ることで行った。



図 10 光スキャナの評価系 Optical scanner test system

表2に試作して得られた光スキャナの特性を示す。共振 周波数は、1.518kHz であった。光スキャナのミラーのパー マロイの重さや梁の形状をレーザを用いてトリミングする 等の方法で共振周波数の微調整は可能であると考えている。 ミラーは 500mrad 走査してもこわれるものが少なかった。 偏向の限界を掴むには実際に破壊実験を行う必要があるが, 他の評価を十分行った後に最終的な実験として予定してい る。Q 値は、走査角度が増加すると減少するが、300mrad の走査角度では、1000 ~ 1100 の範囲であった。測定結果 から、マイクロマシン光スキャナは、仕様を満たすことが 分かった。

表2 マイクロマシン光スキャナの特性 Characteristics of micromachined optical scanner

項目	仕 様	測定結果
共振周波数	1.5kHz	1.518kHz
走查角度 (光学的)	300mrad (17.2deg)	500mrad \sim 600mrad
ミラーサイズ	6mm × 8mm	6mm × 8 mm
Q 値	1000	$1000 \sim 1100$

表3に従来のレーザ外径測定機に用いられている音叉型 光スキャナと試作したマイクロマシン光スキャナを比較し た結果を示す。マイクロマシン光スキャナは、音叉型光ス キャナに比べ消費電力で約1/10,サイズで約1/2になった。 また、分解能は音叉型に比べマイクロマシン光スキャナが 優れていることが分かった。

表3 音叉型光スキャナとマイクロマシン光スキャナの比較 Comparison of characteristics between tuning fork optical scanner and micromachined optical scanner

比較項目	音叉型光スキャナ	マイクロマシン光スキャナ
消費電力 (音叉型を基準)	1	1/10
サイズ (音叉型を基準)	1	1/2
分解能 (スポット径/走査幅)	6.3 × 10 ^{- 4}	3.6 × 10 - 4

6 レーザ外径測定機への応用

マイクロマシン光スキャナの有効性を評価するため,音 叉型光スキャナを搭載した従来型のレーザ外径測定機を用 い,音叉型光スキャナをマイクロマシン光スキャナに置き 換えた。

まず,従来型のレーザ外径測定機の構成を図11を用い て説明する。本測定機は,レーザダイオード,ミラー,音 叉型光スキャナ,電磁石,レンズ,フォトダイオードから 構成される。音叉型光スキャナは,鋼を加工し製作してい る。光スキャナ本体が磁性材料でできているため,本体を 含めた磁気回路を設計し,電磁力で駆動している。



図 11 光スキャナの評価に用いたレーザ外径測定機の構成図 Basic structure of strings diameter measurement system for evaluation of micromachined optical scanner 測定原理は、以下の通りである。レーザダイオードから 出た光は、ミラーで反射された後に音叉型光スキャナに向 かう。光スキャナに入射した光は、光スキャナの機械的な 振動により走査される。走査された光はレンズで平行走査 に変換された後、測定対象である線材に照射される。この とき線材の直径に応じた影ができる。さらに光はレンズを 通過してフォトダイオード面上に結像する。この光の強度 をフォトダイオードで測定すると2値の信号として観測で きる。信号のローレベルは、被測定物である線材の影を示 しており、ローレベルとなるタイミングをパラメータとし て復調処理することにより線材の直径を知ることができる。

試作した光スキャナを従来機のレーザ外径測定機に搭載 し、測定性能を評価した。図12に測定機の構成図を示す。 測定機は、表示部と測定部の2つで構成されている。表示 部は、従来機のものをそのまま用いた。一方、測定部は、 従来機の光学系と駆動用の回路を変更しマイクロマシン光 スキャナが組み込めるようにした。表4にマイクロマシン 光スキャナを搭載したレーザ外径測定機の性能を示す。





表4 マイクロマシン光スキャナを搭載したレーザ外径測定機の性能 Characteristics of strings diameter measurement system mounted micromachined optical scanner

項目	目標仕様	測定結果
非直線性	\pm 2.0 μ m	\pm 1.0 μ m
繰返し性	\pm 0.3 μ m	\pm 0.3 μ m
再現性	\pm 2.0 μ m	\pm 4.5 μ m
安定性 (/±5℃)	± 2.0 μ m	± 2.5 μ m

表における「非直線性」は、直径の異なる複数のゲージ を用いて測定した結果を示している。「繰返し性」は、同一 の方法で同一の被測定物を同じ条件で繰返し測定した場合 の測定値のばらつき(3 σ)を示している。「再現性」は、 20mm × 20mm の範囲において φ 10mm の丸棒の位置を変 え測定した値を示している。「安定性」は、±5℃の温度変 化に対する測定値の変化を示している。測定の結果、「非直 線性」と「繰返し性」は仕様を満足できたが、「再現性」と 「安定性」は仕様を満足することができなかった。「再現性」 が良くない原因は、ミラーのたわみであると考えており、 形状を改良することで解決できると考えている。「安定性」 が良くない原因は、光スキャナとこれを固定する金属の熱 膨張の差が原因のひとつであると考えており、接着方法や 材料を選択することで解決できると考えている。

7 _{まとめ}

マイクロマシニング技術を用いて光スキャナを製作した。 光スキャナは、ミラー、2つの梁、2つのパーマロイ、ス ペーサで構成されている。光スキャナの駆動には電磁力を 用いた。素子と磁気回路の設計は有限要素法シミュレータ を用いた。従来の音叉型光スキャナに比べマイクロマシン 光スキャナの有利な点は、次に示す3点である。

- (1) 従来の音叉型に比べ消費電力が 1/10 になる。
- (2) 従来の音叉型に比べサイズが1/2になる。
- (3) 従来の音叉型に比べ分解能が約2倍になる。

また、本光スキャナをレーザ外径測定機に搭載し、線材 の測定精度を評価した結果、目標仕様をほぼ満足すること が判明した。これらの結果を総合するとマイクロマシン光 スキャナは、レーザ外径測定機に代表される光応用計測シ ステムには有利なスキャナであることが明らかになった。 今後の課題は再現性と温度安定性の向上である。また、光 スキャナの応用範囲を広げるためには高速化が必須である が、マイクロマシン光スキャナは駆動エネルギーが小さい などの利点があり音叉型に比べ高速化には有利である。現 在、基礎実験で 25kHz の駆動に成功しており、更なる高速 化が可能であると考えている。

参考文献

- H. Miyajima, N. Asaoka, M. Arima, Y. Minamoto, K. Murakami, K. Tokuda and K. Matsumoto, AN ELECTROMAGNETIC OPTICAL SCANNER WITH POLYIMIDE-BASED HINGES, Digest of Technical Papers of the 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1999, Vol. 1, pp372 - 375.
- N. Asada, M. Takeuchi, SILICON MICRO-OPTICAL SCAN-NER, Digest of Technical Papers of the 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, 1999, Vol. 1, pp778 - 781.