

MEMS 光ファイバスイッチのデバイス設計小論

A Study on Device Design Strategy for MEMS Fiberoptic Switches

年 吉 洋*

Hiroshi TOSHIYOSHI

1. はじめに — MEMS 光学応用の歴史 —

MEMS (Microelectromechanical Systems) の光学応用は、2000年に発表された米国ルーセント社のルータ¹⁾の印象が強烈であるために、ごく近年になって急に進展したかのような記憶をもたれるかもしれない。ところがそのルーツは意外に古く、1982年には米国IBMのK. Petersen氏がその先駆的論文の中でシリコン片持ち梁アレイによるプロジェクションディスプレイを報告している²⁾。また、1987年には、同じくディスプレイ応用としてテキサスインスツルメンツのL.J. Hornbeck氏が可変ダイヤモンドミラーのマトリクス構造を発明し³⁾、現在のDMDデバイスの成功へとつながっている。また、同じ構造を光ファイバスイッチへと応用する研究を1992年に既に実験的に行っていた⁴⁾。

光MEMSの歴史を製作技術の観点からみると、K. Petersen氏の当時から、我々の研究グループが製作した静電・電磁駆動デジタルミラーの光スイッチ^{5,6)}にいたるまで、おもにシリコン基板のバルクエッチングプロセスと半導体プロセスの応用技術を使っていた。この間を含めて、いくつかのエポックメイキングな技術開発があった。米国MCNC社(現Cronos社)の標準2層ポリシリコン表面マイクロマシニング技術によるマルチチップファウンダリーサービスはMEMS技術の浸透に大きく貢献した⁷⁾。カリフォルニア大学パークレー校のK. Pister教授による3次元マイクロ立体構造の組み立て方法⁸⁾はカリフォルニア大学ロサンゼルス校のMing C. Wu教授の研究グループによりマイクロオプティカルベンチという新概念に発達した⁹⁾。同時期に、表面マイクロマシニングに適した駆動機構であるスクラッチドライブアクチュエータが秋山氏により提案され¹⁰⁾、さまざまな光MEMSの駆動機構、組み立て機構として利用されている。最近では、シリコンの高アスペク

ト比シリコンエッチング技術が一般化して、特に櫛歯型静電アクチュエータの発生力向上に寄与している^{11,12)}。

1996年に光ファイバ通信に波長多重通信(wavelength division multiplexing, WDM)が実用化されるようになると、MEMS技術が光クロスコネクタの原理として本格的に注目を集めるようになった。現在ではまだ光-電気変換(OE)、電気-光変換(EO)による信号処理によってスイッチング経路を制御するクロスコネクタが主流であるが、OE、EO変換による通信帯域の上限がネットワーク全体の帯域のボトルネックとなっている。これを回避するにはスイッチングハードウェアの並列化に頼るほかないが、その価格は膨大なものになる。したがって、MEMS光スイッチに期待される性能は低コストとAll-Opticalであることの2点である。製作は半導体プロセスと同じくバッチ処理によるものなので、集積化によるスイッチ入出力数のスケールアップが可能である。なお、スイッチング速度に関しては、現行のSONETのそれが50ms程度であるため、機械構造によっても十分置き換えることが可能であると考えられている。

では一体、光MEMS技術とはどの程度enabling technologyなのであろうか。光ファイバネットワークはトップダウン方式で構築される典型的な例であり、システムエンジニアの期待とMEMS設計の限界が合致しないこともあり得る。ここではMEMSデザイナーの立場から考えて、何が可能でどこが困難であるかをボトムアップ的に整理してみよう。本稿が、これからMEMS技術の光学応用を検討される方々の参考になれば幸いである。なお本稿は、著者がOptical MEMS'01にて発表した招待講演に基づいている¹³⁾。

2. 2次元MEMS光スキャナの設計方法

図1はシリコン表面マイクロマシニング技術で製作した2次元光スキャニングミラーの典型的な例である¹⁴⁾。中央に一辺400 μm のミラーがあり、直交する2軸のトーショ

*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

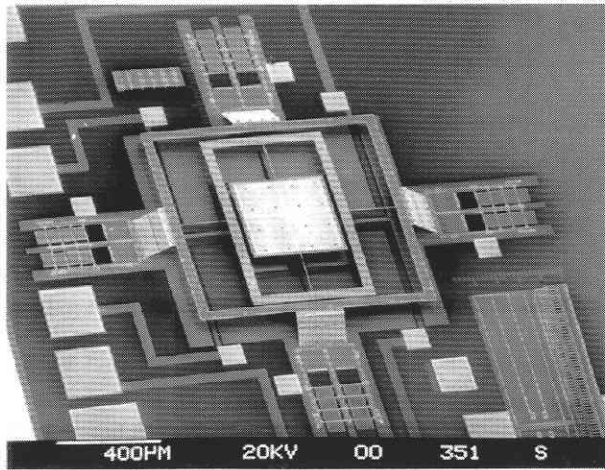


図1 ポリシリコン表面マイクロマシニングで製作したMEMS 2次元静電光スキャナ

ンバーで支えられている。ミラー下部の「田」の字型電極に電圧を印加すると、静電引力によって2方向に傾くことができる。このミラーをアレイ化したチップを2セット用いて、ファイバコリメータ間の自由空間で光スイッチングを行うというのが3次元型MEMS光スイッチの基本構成である。ファイバ束間の3次元空間を使っているためにこの呼称がある。一方、ファイバリボン間の2次元平面をスイッチングに用いる方式を2次元型MEMS光スイッチと称する。両者の大きな相違は、ミラーの制御をアナログで行うか、あるいは、デジタル方式にするかという点にある。また、前者の3次元構成の場合、入出力ファイバ間の距離がスイッチ状態に関わらずほぼ一定であるために、スイッチ状態の違いによる挿入損失の分布が小さいという利点がある。従って、入出力数が 1024×1024 以上の大規模クロスコネクタを構成するには3次元MEMSスイッチが適している。ちなみに、現在のWDMでは、2.5 Gbpsのレートで8、16波多重が多く用いられているが(OC-48)、すでに10 Gbps以上で32波対応の製品も存在する。数年内には幹線系に512波以上が要求されるようになるだろう。WDMシステムとMEMSの関わりに関しては、すでに文献¹⁵⁾に解説した。

さて、3次元MEMS光スイッチに使われる2次元スキャナの仕様を列挙すると以下のようになる。すなわち、ミラーの直径はサブミリ程度、平坦性とたわみはどちらも波長の $1/20$ 以下(-25°C から $+75^{\circ}\text{C}$ まで)で小さいほど良い。入出力数1024以上(一辺で32以上の四角)をカバーするためには角度変位が 10° 以上が望ましく、24 V以下の低電圧で駆動したい。かつ、応答速度としてミリ秒以下が望ましく、したがって、共振点はkHz以上を設定する。また、動作時の機械的外乱に対して、100 G以上の耐震性

が要求される。もちろん、配置はチップ面内稠密とする。

はたして、これらを全部満たす設計上の解はあり得るだろうか。これが、MEMSデザイナーの現在の大問題である。すでに製品化された3次元MEMS光スイッチもあるが、すべての要求を満たしているわけではなく、プロセス上の制約などにより、ある程度妥協した設計になることが多い。たとえば、低電圧で角度を大きくするには、ミラーを支えるサスペンションの剛性を低くすれば済むが、同時に共振周波数が下がって応答が悪くなり、かつ振動の外乱にも弱くなる。また、ミラー平坦性の温度特性を良くするにはミラーの部材を厚くすればよいが、プロセスによってはサスペンションも一緒に厚く(硬く)なって、同じ駆動力のもとでの角度変位が小さくなる。このように、設計パラメタは相互に密接な関係があるので総合設計のストライクゾーンはかなり狭い。何度か設計パラメタを振って試作を重ねてもなかなか仕様を満たす結果が得られないことがあるが、その場合には、そもそも要求仕様を原理的に達成可能かどうかを疑ったほうがよい。

スキャナを設計するための指針として、図2に要求パラメタと設計上の内部パラメタを関連づけるチャートを示す。ここでは、クロスコネクタの入出力ポート数から順番に見ていくことにするが、実は、どの仕様から始めても最後には同じ結論に達するのである。すなわち、結論とは、ミラーを駆動するアクチュエータの出力の大小ですべての特性が左右される、という事実である。

具体的に図2の設計手順を追ってみる。以下の()の中の数字がチャート上の手順を表す。まず、システム設計から要求される入出力ポート数(1)を満たすためには、ミラーの角度の最大値(2)を決定する必要がある。図1のミラーの場合、ミラーの一辺の長さが $400 \mu\text{m}$ でアセンブル後の高さが $72 \mu\text{m}$ であるため、ミラーが基板に接触する最大角度は 19.8° である。ただし、ギャップクローキング型(印加電圧による静電引力で電極間の間が狭まることで変位を発生する)であるため、安定にミラーを制御できる角度範囲はコンタクト角度の $1/3$ 程度の約 6.6° となる。次に、挿入損失(3)を抑制するためには、ファイバからの出射光をある程度大きな収束光に変換する必要がある。従来のMEMSミラーでは製作できるミラーの大きさに上限があり、数百 μm 角程度が一般的であった。最近では結合効率を良くするために、直径1 mm程度のビームに収束するレンズ(4)が用いられている。従って、ミラーにおけるクリッピング損失を防ぐために、収束光の直径(5)よりも若干大きめのミラー(6)が使われている。また、無反射コーティングしたコリメータどうしの光軸を最適化したときには、結合効率0.5 dB程度が得られるが⁶⁾、ミラーの反射やビームの広がりを考慮すると、3次元MEMS構成時の結合損失は1~数dBとなる。

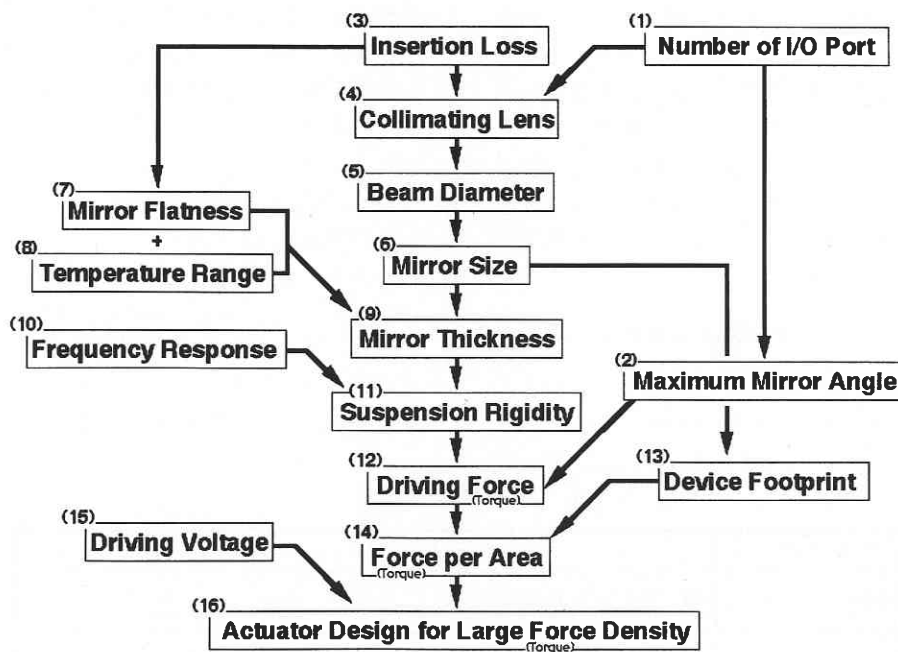


図2 MEMS 光スキャナ的设计フローチャート

MUMPs のプロセスの場合、ポリシリコン層を2層重ねると最大で $3.5 \mu\text{m}$ の厚みが得られる。ところが、その上にクロム金を蒸着すると熱膨張係数の違いによる残留応力が生じて、リリース後の $400 \mu\text{m}$ 角のミラーの反り (7) は Peak-to-Valley で $2 \mu\text{m}$ 程度になる¹⁶⁾。よって、 -25°C から $+75^\circ\text{C}$ までの温度範囲 (8) でミラーの平坦性を波長の $1/20$ 以下に抑制するためには、厚さ $10 \mu\text{m}$ 以上 (9) のミラーが必要となる。これが、最近バルクシリコンのミラーがよく使われている理由のひとつである^{17,18)}。ミラーの反りの計算方法は、サーモスタットの温度変形に関する Timoshenko の論文¹⁹⁾ とそれを引用した最近の文献²⁰⁾ が参考になる。

ミラーが一樣に厚くなると、質量も比例して大きくなる。よって、2次の共振系としての共振周波数 (10) をある程度以上高く設計するためには、ミラーを保持するサスペンションの剛性 (11) を大きく設計しなければならない。ところが、サスペンション剛性を高くしすぎると、今度は同じ駆動電圧の下でのスキャン角度が小さくなってしまふ。そこで、駆動に必要な力 (12) をサスペンション剛性とスキャン角度の積で計算して、サスペンション剛性が妥当かどうか確認する必要がある。駆動力を大きくするにはアクチュエータ部分の面積 (駆動方式によっては体積) を大きくすればよいが、ミラーの集積化のためにはデバイス当たりの占有面積 (13) に上限を設定しなければならない。したがって、単にアクチュエータの発生力を比較するだけでなく、単位面積当たりで発生可能な力 (力の密度、14) で

議論する必要がある。さらに、駆動電圧 (静電駆動の場合、15) にも上限が設定される。一般的に安価なオペアンプで駆動可能な 24V 以下が望ましいが、報告例では 100V 以上の駆動電圧を必要とするものが多い^{1,18)}。このように、ミラー (光スイッチ) の特性が、最後はアクチュエータの発生力に依存することが示された。

スキャナ設計に当たって特に注意すべき事は、共振周波数と最大 (角度) 変位には一定の関係があり、ともに無制限に大きくできる訳ではないという事である。質量 m とバネ定数 k で決まる2次の共振系の場合、その共振周波数と最大変位は以下の式で表される。

$$\begin{cases} f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (1) \\ D_{\max} = \frac{F_{\max}}{k} \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

設計上変えられるパラメタのひとつとしてサスペンションの剛性 k がある。この k を上の式から消去すると、

$$f_0^2 \cdot D_{\max} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{F_{\max}}{m} \dots\dots\dots (3)$$

という関係式が得られる (FD積)。この式が意味するところは、振動系の質量とそれに加わる外力が一定の場合、最大変位と共振周波数の自乗の積は定数となり、それぞれトレードオフの関係にあるという設計上の制限である¹³⁾。したがって、両方を同時に大きくしたいときには、外力

(すなわちアクチュエータの発生力)を向上するか、振動系を軽量化する他に手段はない。ミラーの平坦性を追求するためバルクシリコンのミラーを用いるとき、共振周波数一定の条件をも課すと、DC的な角度変位は極端に小さくなってしまふのは、式(3)で示されるFD積一定の原理によるものである。よって、バルクミラーを用いる場合には、アクチュエータ発生力を大幅に改善する必要がある。

3. MEMS スキャナの最近の傾向

最近では、アクチュエータの発生力を高めるための工夫が多数報告されている。例えばNTTからはミラー下の電

極が階段ピラミッドのような形になっている2次元スキャナが発表された¹⁸⁾。対抗電極に傾斜を付けることでミラーの最大角度を損ねることなく低電圧駆動化しようとする試みであり、100Vでミラー角度6°が得られている。ただし、ミラーがピラミッドの頂点で支えられた構造になっているので、駆動特性に摩擦によるヒステリシスが生じるおそれがある。

バルクミラーを使う魅力は、駆動メカニズムとしてギャップクロージング以外の方法を取りうるという点にある。アナログデバイスから最近報告されたバルクミラーは従来型のギャップクロージングで、角度変位が2°と小さい。一方、スタンフォードのSolgaard教授の研究グループ

表I 光MEMS関連企業リスト

企業・研究所名	研究内容・コンタクトアドレス
筆者	http://toshi.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/ http://toshi.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/Optical_MEMS_Company_List.html
OMM Inc.	MEMS 2D OXC http://www.omminc.com/
Lucent Technologies	R&D on optical MEMS devices: http://www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/mems.html http://www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/pop_up_mems11.html Lambda Router: http://www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/pop_up_mems12.html
Agere	64 x 64 MEMS 3D OXC http://www.lucent.com/micro/
Cronos Integrated Microsystems	MEMS OXC and variable optical attenuator (VOA) http://www.memsrus.com/cronos/prodvoa.html
Iolon	MEMS tunable external cavity laser http://www.iolon.com/
Sercalo	MEMS 2D OXC http://www.sercalo.com/
Axiowave Networks	MEMS OXC http://www.axiowave.com/
Transparent Networks	MEMS OXC http://www.transparentnetworks.com/
ONIX Microsystems	MEMS 2D OXC http://www.onixmicrosystems.com/index2.html
Calient Networks	MEMS 3D OXC (Kionix) http://www.calient.net/home.html
Nortel Networks	MEMS 3D OXC (XROS) http://www.nortelnetworks.com/
Kymata Netherlands	Diffraction Optic 3D OXC http://www.kymata.nl/mems/oxc.html
Tellium	http://www.tellium.com/
Piezo Sysmtems Inc.	piezo 2D scanner http://www.piezo.com/iag2.html
Texas Instruments	MEMS 2D Scanner for wireless LAN http://www.ti.com/sc/docs/products/msp/telecom/alp/overview.htm
Piezosystem Jena	4x4 OXC http://www.piezojena.com/start.html
Others	MEMS companies listed in Lightreading (Oct. 2000) http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=2254&page_number=6

が提唱しているバルクの縦型櫛歯構造を使うと、ミラーの角度変位-印加電圧の関係が大幅に改善される¹¹⁾。同じく縦型櫛歯でも、UCLAのMing C. Wu教授の研究グループでは、ワンマスクのセルフアラインによる櫛歯の片側をヒンジ部分の表面張力で引き出して初期オフセット角度を決定する方法が報告されている¹²⁾。ただし、これらの発表はまだ1次元スキャナの段階であって、この手法を2次元スキャナに展開するには複雑な電気配線とプロセスを工夫する必要がある。また、UC BerkeleyのBSAC研究所とその関連ベンチャーからは、櫛歯型アクチュエータでトーションバーの回転中心から外れたところを引っ張ってトルクを発生する原理が報告されている²¹⁾。100 V駆動でミラー角度8~22°が得られており、共振周波数も2 kHz~4.6 kHzと今までのスキャナよりも高い。難点は、ミラーに較べてアクチュエータ部分の面積が大きくてフィルファクターが低い点であるが、これは改善の余地がある。

光スキャナはクロスコネクタ以外にもさまざまな用途がある。MEMSにおける光スキャナは半導体回路のトランジスタと同じ位置づけにある。不純物濃度とデバイス各部の寸法、電界の相違によって、トランジスタには大電流型、高耐圧型、高速型などの種類がある。同様に光スキャナにも共振型、DCゲイン型、超小型(TIのDMD)、大型(TIとAstarte'の電磁OXCミラー²²⁾)など、材質、寸法の相違により、いくつかの種類が存在する。

たとえば共振型では、光ファイバ製造プラントでファイバ直径を計測する装置の一部としての光スキャナ応用がアンリツから報告されている²³⁾。このスキャナは1次元の電磁共振型であり、レーザ光のラインをファイバに直角に投影して、影ができる時間を計測することで伸張中のファイバ径を見るものである。同様のミラーは、横河電機からも水晶基板の異方性エッチングで製作したレーザープリンタ用のガルバノミラーとして報告されている²⁴⁾。また、オムロンからも共振2次元スキャナとレーザ、検出器を集積化した画像読みとり装置が発表されている²⁵⁾。さらに、米国MICROVISION社からは、MEMS共振ミラーを2個用いた2次元スキャン系を網膜直描型のヘッドアップディスプレイに応用した製品がリリースされている²⁶⁾。このほか、まだまだ発掘されていない用途は多く存在すると思われる。図2のフローチャートに従えば、それぞれに最適な設計パラメタを比較的簡単に探索して求めることができよう。本稿で紹介したMEMSミラー応用はほんの一部分である。表1に関連ベンチャー企業などのリストを示す。

4. ま と め

本論文では、光ファイバスイッチ応用のMEMSスキヤニングミラーの設計手法に関して、各種パラメタの合理的な決定方法を提案した。半導体プロセスを応用したマイク

ロマシニングでは、材料・プロセスに由来する制約のために機械構造の寸法設計に関する自由度が低いが、ここで述べた方法を用いればデバイスのどこをどう改善すればよいのかが明確になるだろう。また、この方法はミラーに限らず、各種MEMSデバイスの設計にも適用できる。特に、式(3)で示したFD積一定の制限は、2次の共振系で表されるすべての振動系に共通する現象である。

謝 辞

本論文で取り上げたMEMS光スキャナとその設計手法に関する知見はUCLAのMing C. Wu教授の研究グループとの共同研究によるものである。

(2001年12月11日受理)

参 考 文 献

- 1) D.T. Neilson *et al.*, "Fully Provisioned 112x112 Micro-Mechanical Optical Crossconnect with 35.8 Tb/s Demonstrated Capacity," Proc. 25th Optical Fiber Comm. Conf (OFC 2000), Baltimore, MD, Mar. 7-10, 2000, PD 12-1.
- 2) K.E. Petersen "Silicon as a Mechanical Material", °Proceedings of the IEEE, Vol. 70, No. 5, May 1982.
- 3) L.J. Hornbeck, "Deformable-Mirror Spatial light Modulators," Spatial Light Modulators and Applications III, SPIE Critical Reviews, Vol. 1150, pp. 86-102 (1989).
- 4) R.M. Boyssel, T.G. McDonald, G.A. Magel, G.C. Smith, J.L. Leonard, "Integration of Deformable Mirror Devices with Optical Fibers and Waveguides," SPIE Integrated Optics and Microstructures, vol. 1793, 34-39 (1992).
- 5) Hiroshi Toshiyoshi, Hiroyuki Fujita, "Electrostatic Micro Torsion Mirrors for an Optical Switch Matrix," IEEE J. Microelectromechanical Systems 5 (4), (1996. 12), pp. 231-237.
- 6) Hiroshi Toshiyoshi, Daisuke Miyauchi, Hiroyuki Fujita, "Electromagnetic Torsion Mirrors for Self-Aligned Fiber Optic Cross-connectors by Silicon Micromachining," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE), special issue on Micro-Opto-Electro Mechanical Systems (MOEMS), vol. 5, No. 1 (1999), pp. 10-17.
- 7) <http://www.memsrus.com/>
- 8) K.S.J. Pister, M.W. Judy, S.R. Burgett, R.S. Fearing, "Microfabricated hinges," Sensors & Actuators A 33, (1992).
- 9) "Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems," M.C. Wu, *Proceedings IEEE*, Vol. 85, No. 11, pp. 1833-1856, November 1997.
- 10) T. Akiyama, D. Collard, H. Fujita, "Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS," Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, (no. 1), IEEE, March 1997. p. 10-17.
- 11) U. Krishnamoorthy, O. Solgaard, "Self-aligned Vertical Combdrive Actuators for Optical Scanning Micromirrors," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan, pp. 41-42.
- 12) P. Patterson, D. Hah, H. Chang, H. Toshiyoshi, M.C. Wu, "An

- Angular Vertical Comb Drive Actuator for Scanning Micromirrors," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan, pp. 25-26.
- 13) Hiroshi Toshiyoshi, "Design Strategy for MEMS 2 D Scanning Mirrors," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan (invited).
 - 14) Hiroshi Toshiyoshi, Wibool Piyawattanametha, Cheng Ta Chan, and Ming C. Wu, "Linearization of Electrostatically Actuated Surface Micromachined 2 D Optical Scanner", IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst. volume 10, June, 2001, pp. 205-214.
 - 15) 藤田博之, 年吉 洋, 「マイクロメカニカル光デバイス」応用物理, vol. 69, No. 11, 2000, pp. 1274-1284.
 - 16) G.-D. J. Su, H. Toshiyoshi, M. C. Wu, "Surface-micromachined 2-D optical scanners with high-performance single-crystalline silicon micromirrors," IEEE Photonics Technology Letters 13: (6) 606-608 JUN 2001.
 - 17) 藤森弘己, 鈴木 伸夫, 平成 13 年 11 月 18 日, 光マイクロマシン技術協同研究委員会, 招待講演.
 - 18) R. Sawada, E. Higurashi, A. Shimizu, T. Maruno, "Single Crystalline Mirror Actuated Electrostatically by Terraced Electrodes with High-Aspect Ratio Torsion Spring," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan, pp. 23-24.
 - 19) S. Timoshenko "Analysis of bi-metal thermostat," Journal of Optical Society of America, vol. 11, p. 233 (1925).
 - 20) W. Riethmuller, W. Benecke, "Thermally Excited Silicon Microactuators," IEEE Trans. ED, vol. 35, No. 6, p. 758-(1988).
 - 21) V. Milanovic', M. Last, K.S.J. Pister, "Monolithic Silicon Micromirrors with Large Scanning Angle," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan, pp. 135-136.
 - 22) A.S. Dewa, J.W. Orcutt, M. Hudson, D. Krozier, A. Richards, and H. Laor, "Development of a Silicon Two-Axis Micromirror for an Optical Cross-connect," Tech. Digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop (Hilton Head 2000), Hilton Head Island, SC, June 4-8, 2000, p. 93.
 - 23) Y. Takahashi, T. Takeuchi, G. Reyne, H. Fujita, "Micromachined optical scanner for strings diameter measurement system," Proc. 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS (Optical MEMS 2001), 25-28 Sept., 2001, Okinawa, Japan, pp. 9-10.
 - 24) T. Ueda, F. Kohsaka, D. Yamazaki, "Quartz Crystal Micromechanical Devices," Proc. of Int. Conf on Solid-State Sensors and Actuators (TRANSDUCERS 85), pp. 113-116 (1985).
 - 25) M. Ikeda, H. Goto, M. Sakata, S. Wakabayashi, "Two Dimensional Silicon Micromachined Optical Scanner Integrated with Photo Detector and Piezoresistor," The 8 th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (TRANSDUCERS 85), Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, vol. 1, pp. 293-296.
 - 26) <http://www.mvis.com/>