

小型・低電圧広角走査 圧電MEMSスキャナ

Piezoelectric MEMS Scanner for Compact, Low-Voltage, and Wide-Angle Deflection

藤島 正幸*	阿部 洋輔*	赤沼 悟一*	橋口 強*	新川 瑞季*
Masayuki FUJISHIMA	Yousuke ABE	Goichi AKANUMA	Tsuyoshi HASHIGUCHI	Mizuki SHINKAWA
佐藤 正章*	鈴木 修一*	坂井 篤*	石本 幸由*	
Masaaki SATO	Shuichi SUZUKI	Atsushi SAKAI	Yukiyoshi ISHIMOTO	

要 旨

はたらく人の創造性向上を支援するため、ウェアラブル表示機器に向けたカンチレバー型アクチュエータを持つ共振型1軸圧電MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) スキャナを提案し、小型かつ低電圧駆動による広角なレーザービーム走査を実証した。製作したMEMSスキャナは、チップサイズ $5.2\text{mm} \times 3.8\text{mm}$ 、駆動電圧 7Vpp 、 19.53kHz の周波数において 98.8° の光走査角を達成した。提案したカンチレバー型MEMSスキャナは、チップサイズと駆動電圧を考慮したFoM (Figure of Merit) 評価において、これまでに報告されているMEMSスキャナよりも優れている。

提案した1次元MEMSスキャナは、高速で広角な水平方向の光走査を可能にし、低速の垂直走査用スキャナと組み合わせることで、コンパクトかつ低電圧で駆動可能な表示機器を実現できる。

ABSTRACT

To stimulate workers' creativity, a resonant 1D piezoelectric micro electro mechanical systems (MEMS) scanner with a cantilever-type actuator for wearable display devices, and wide-angle deflection was demonstrated despite its small size and low voltage. The fabricated MEMS scanner achieved an optical scan angle of 98.8° with a mirror element size of $5.2 \times 3.8 \text{ mm}^2$, a drive voltage of 7 Vpp , and a frequency of 19.53 kHz . The proposed cantilever-type MEMS scanner was evaluated in terms of FoM and demonstrated a smaller chip size and lower drive voltage than that of previously reported MEMS scanners.

The proposed 1D MEMS scanner enables high-speed, wide-angle horizontal laser scanning and can be combined with a low-speed vertical optical scanner to achieve a compact, low-voltage driven display device.

* 先端技術研究所 IMD研究センター
Intelligent Micro Device Institute, Advanced Technology R&D Division

本稿はIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) の以下の論文を基に許諾を受けて作成した。

Y. Abe et al.: Piezoelectric MEMS Mirror with Cantilever-Type Actuator for Compact, Low-Voltage Drive, and Wide-Angle Deflection, 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 1007-1010 (2024).

1. 背景と目的

リコーは、2036年ビジョン「“はたらく”に喜びを」の実現に向け、はたらく人がより付加価値のある仕事に取り組み、創造性を発揮できる環境を提供することを目指している。はたらく人が創造性を発揮するためには、はたらく人の生産性／作業効率向上による単純作業の負荷低減や、創造的な仕事を支援する情報提供が必要であり、ウェアラブル表示機器が重要な役割を果たすと考えられる。

このようなウェアラブル表示機器の代表例の一つにAR (Augmented Reality) グラスが挙げられる。ARグラスは、製造、建築、物流、医療など幅広い市場での導入が検討されており、例えば、生産ラインの作業者に作業マニュアルを提示することや、熟練した作業者による指示内容を表示することによって、作業効率の向上や短期間でのスキル習得の効果が得られる。また、ARグラスを使用することで、作業中にマニュアル等を手に持って参照する必要がなくなり、両手が自由に使えるので安全性の向上を図れる。

ARグラスのようなウェアラブル表示機器では、長時間装着しても使用者がストレスを感じないよう、小型・軽量であることが求められる。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) スキャナによってレーザービームを走査するレーザー走査型プロジェクタは、レーザー光源による鮮明な映像生成に加えて、小型・軽量かつ低消費電力での動作が可能であることなど、ウェアラブル表示機器として優れた特徴がある。

2. ウェアラブル表示機器におけるMEMSスキャナの課題

MEMSスキャナはガルバノミラーのような光走査デバイスに比べて小型・軽量な光走査デバイスであり、ウェアラブル表示機器に適している。MEMSスキャナを用いて画像を表示するためには、水平かつ

垂直方向の直交する2方向に光を走査する必要がある。代表的な光走査方式の1つに、高速な光走査（主走査）と、低速な光走査（副走査）を組み合わせたラスタ走査がある（Fig. 1）。一般的なウェアラブル表示機器に要求される解像度である640×480 pixels以上を実現するには、ミラー径や光走査角にも依存するものの、主走査の走査周波数を約16kHz以上にすることが必要¹⁾。

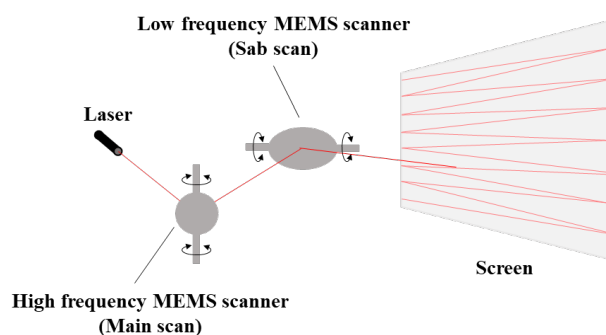


Fig. 1 Schematic structure of a 2-mirror raster scanner.

主走査に必要な走査周波数を維持しながら、画像表示領域を拡大し、表示位置や表現の自由度を確保するために、高速かつ広角な光走査が可能な共振駆動型MEMSスキャナが検討されてきた。特にチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）などの圧電材料を使用した圧電駆動方式のMEMSスキャナは、静電駆動方式のMEMSスキャナの駆動電圧（一般的に100V超の電圧）と比べて低い電圧（一般的に数10V以下の電圧）で高い駆動力を発生させることができるため、光走査デバイスの小型化や低電圧駆動に有利であり²⁾、近年多くの研究例が報告されている³⁻⁶⁾。

ラスタ走査の主走査に用いられる典型的な圧電MEMSスキャナは、Fig. 2 (a)に示すように1対のアクチュエータがミラーの回転軸に対して対称に配置され、両側からトーションバーに接続された構造をしている³⁾。Fig. 2 (b)に圧電MEMSスキャナの断面構造を示す。圧電アクチュエータは、上下電極に挟まれたPZT薄膜がSi活性層上に備えられた構造をしている。この上下電極間に電圧を印加すると、PZT薄膜が伸縮し、圧電アクチュエータとトーション

バーの接続部が上下方向に変位する。このような圧電MEMSスキャナは、高解像度のウェアラブル表示機器を実現する上で十分に高い共振周波数を持ち、加えて回転が安定するという利点がある。一方で、アクチュエータの剛性が高くなるため、駆動電圧が高くなる、もしくはチップサイズが大きくなってしまふという点で問題があった^{4,5)}。また、Fig. 3に示すようなアクチュエータを蛇行バネで接続した構造も報告されている⁶⁾。このような構造では、小型かつ低電圧で広い走査角が得られる反面、共振周波数が数kHz程度と低く、高解像での画像表示を必要とする用途には不向きであった。

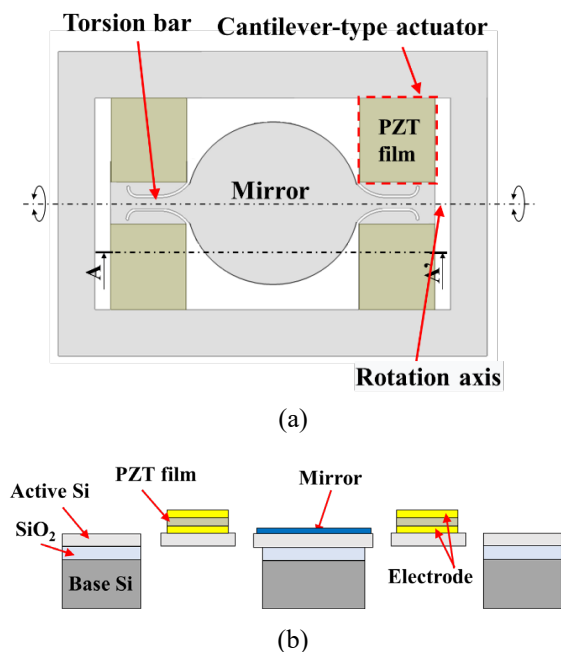


Fig. 2 Schematic structure of a typical MEMS scanner with piezoelectric actuators.³⁾
(a) Top view (b) Cross section of AA'

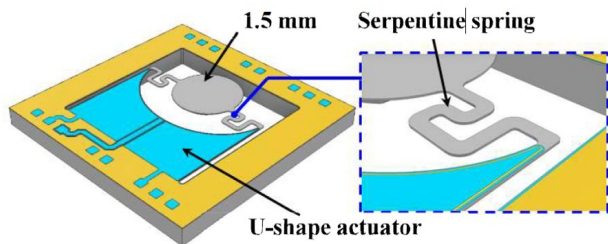


Fig. 3 Schematic structure of a MEMS scanner with serpentine springs.⁶⁾

本稿では、長辺が6mm以下と小型でありながら、約20kHzという高い共振周波数を持ち、10V以下の低い駆動電圧で80°以上の広角光走査が可能なカンチレバー型アクチュエータを持つ共振駆動型圧電MEMSスキャナを紹介する。製作したMEMSスキャナの特性を示し、チップサイズと駆動電圧を含む性能指標 (FoM: Figure of Merit) によって、既存の圧電MEMSスキャナとの性能比較を行う。

3. 構造設計

我々は、小型かつ低電圧駆動でありながら広角走査が可能なMEMSスキャナを実現するため、Fig. 4に示すようなカンチレバー型圧電アクチュエータを持つMEMSスキャナを開発した。以後、本稿ではカンチレバー型圧電アクチュエータを持つMEMSスキャナをカンチレバー型MEMSスキャナと呼ぶこととする。

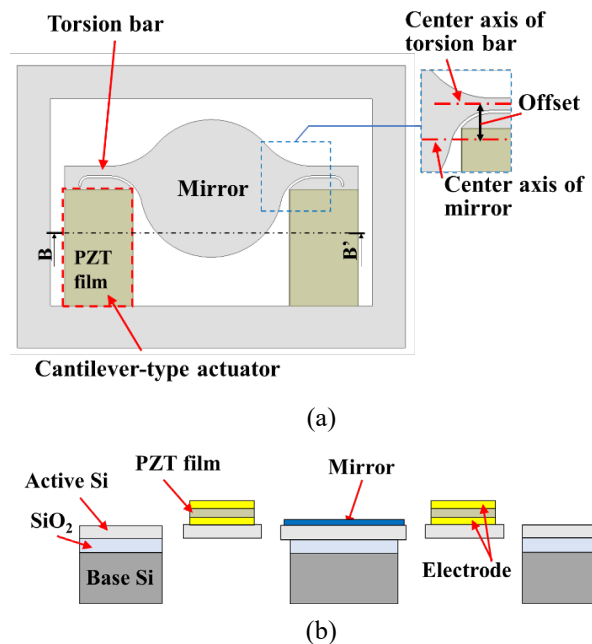


Fig. 4 Schematic structure of cantilever-type MEMS mirror.

カンチレバー型MEMSスキャナの特徴は、圧電アクチュエータの自由端がミラーを支持するトーションバーに接続され、更にトーションバーがミラー中

心軸に対してオフセットしてミラーに接続されていることである。すなわち、圧電アクチュエータとトーションバーの接続部の変位が1つの圧電アクチュエータ構造で拘束されている。一方でFig. 2に示すような回転軸に対して圧電アクチュエータを対称に配置したMEMSスキャナでは、圧電アクチュエータとトーションバーの接続部がトーションバーを挟んで対向する2つの圧電アクチュエータ構造により拘束されている。このため、カンチレバー型MEMSスキャナは、回転軸に対してアクチュエータを対称に配置した圧電MEMSスキャナと比べて、同じ駆動力でも圧電アクチュエータとトーションバーの接続部を大きく変位させることができる。従って、カンチレバー型MEMSスキャナでは、低い駆動電圧もしくは小面積の圧電アクチュエータで所望の光走査角を得ることができ、小型・低電圧駆動のMEMSスキャナが実現できる。

一方で、カンチレバー型MEMSスキャナの短所は、アクチュエータとトーションバーの接続部においてMEMSスキャナ表面に対して垂直な方向に変位が生じることである。この影響でミラーが垂直方向に振動し、走査光に意図しないゆらぎや乱れが重畳される。そこで我々は、ミラーの中心軸に対してオフセットを設けてトーションバーをミラーに接続することで、垂直方向のミラーの振動を抑制した。

カンチレバー型MEMSスキャナの詳細な構造はFEM (Finite Element Method) シミュレーションを使用して設計した。Fig. 5は設計したMEMSスキャナの固有値解析結果である。ミラー回転モードは2ndモードであり、ウェアラブル表示機器に要求される解像度に鑑みて共振周波数が20kHzとなるように構造パラメータを決定した。1stモードはミラー全体が垂直方向に振動する並進モードであり、3rdモードは目的のスキャン方向と直交する方向にミラーが回転する振動モードである。2ndモードのミラー回転振動に対して不要な振動モードが干渉しないように、1stおよび3rdモードの共振周波数の基準値を予備試作によって導き、その基準値を満足するようにMEMSスキャナ構造を決定した。

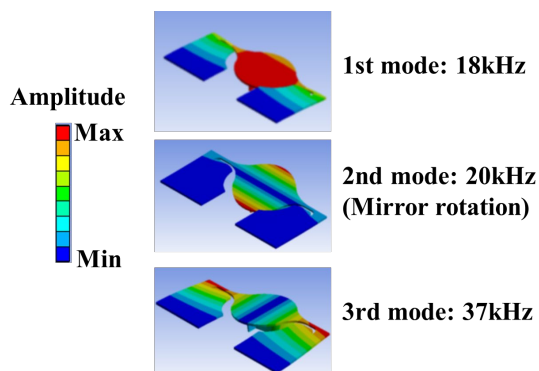


Fig. 5 Simulated vibration modes. The 1st mode is translational motion, the 2nd mode is rotational motion, and the 3rd mode is perpendicular rotational motion of the mirror.

4. デバイス性能

製作したMEMSスキャナの写真を図6に示す。1チップ内に、3つのMEMSスキャナが配置されている。各スキャナ要素のサイズは5.2mm×3.8mmである。このMEMSスキャナは、SOI (Silicon on Insulator) ウェハを使用して製作した。PZT膜はスパッタリングにより成膜され、Si層はICP-RIE (Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching) 技術を使用してエッチングされた。

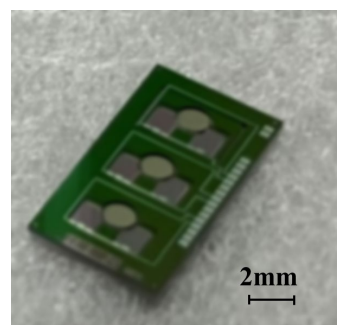


Fig. 6 Photograph of the fabricated MEMS mirror chip.

Fig. 7は、製作したMEMSスキャナに駆動信号として2Vpp~7Vppの正弦波電圧を印加したときの光走査角の周波数特性を示している。製作したMEMSスキャナは7Vppの駆動電圧および19.53kHzの駆動

周波数において98.8°の光走査角を達成した。Fig. 8は走査線軌跡の一例である。設計通りミラー回転モードに不要な振動モードが影響を与えることなく、歪みやジッターのない走査線が得られた。

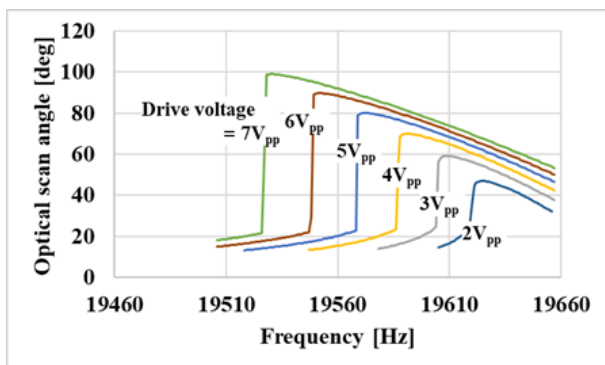


Fig. 7 Frequency responses for drive voltages from 2 to 7 Vpp.



Fig. 8 Scanning line trajectory for optical scan angle of 98.8°.

Fig. 9はレーザードップラー振動計（ポリテック社製、MSA-100-3D）を用いて測定したミラー回転挙動の様子である。レーザードップラー振動計で計測可能な範囲において、MEMSスキャナには1stモードおよび3rdモードに起因する振動が発生しないことを確認した。

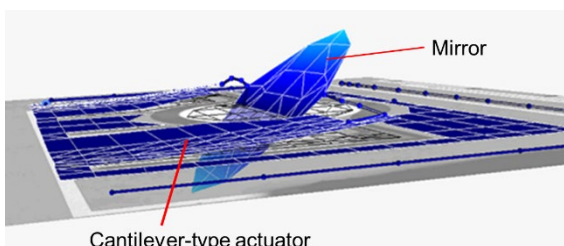


Fig. 9 Rotational behavior of cantilever-type MEMS mirror measured by Laser Doppler Vibrometer.

我々が開発したカンチレバー型MEMSスキャナと既報の圧電MEMSスキャナの性能を比較するために、チップサイズ、駆動電圧、走査角、共振周波数、ミラーサイズを考慮した性能指標（FoM）を以下のように定義した。

$$FoM = (\theta_{opt} \cdot D \cdot f) / (V \cdot A)$$

FoMはMEMSスキャナの各性能のトレードオフを考慮した評価指標であり、その値が大きいほど高性能である。ここで、 θ_{opt} は光走査角度、 D は走査方向に沿ったミラー幅、 f は駆動周波数（共振周波数）、 V は駆動電圧、 A はチップ面積である。

Fig. 10に圧電MEMSスキャナの性能比較を示す。提案したカンチレバー型MEMSスキャナは、上記で定義したFoMで評価した場合、これまで報告されているMEMSスキャナ³⁻⁶⁾よりも優れている。これはウェアラブル表示機器への搭載に必須な、小型チップサイズおよび低電圧駆動による広角走査を両立させる上で、カンチレバー型MEMSスキャナが有利であることを示している。例えば、チップサイズ、駆動電圧、ミラーサイズ、共振周波数が同じ場合、我々が開発したカンチレバー型MEMSスキャナは過去の報告例と比べて光走査角が39.5%以上向上する。すなわち、広角走査により画像表示領域を拡大することができるので、従来技術と比べて表示位置の自由度が高く、表現力に富んだ映像描画が可能となる。

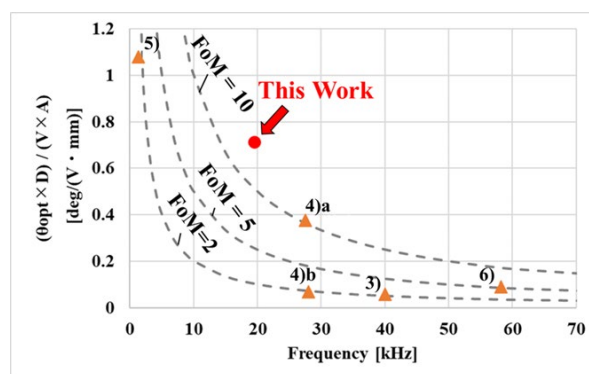


Fig. 10 Comparison of characteristics of piezoelectric MEMS mirrors.

5. 結論

はたらく人が付加価値のある仕事に取り組み、創造性を発揮できる環境を提供するために、ウェアラブル表示機器に適した小型かつ低電圧駆動で広角走査が可能な共振型1軸圧電MEMSスキャナを実証した。

提案したカンチレバー型MEMSスキャナは、チップサイズ5.2mm×3.8mm、駆動電圧7V_{pp}、19.53kHzの駆動周波数において98.8°の光走査角を達成した。チップサイズと駆動電圧を考慮したFoM評価において、カンチレバー型MEMSスキャナは、既報の圧電MEMSスキャナよりも優れている。

高速かつ広角で水平方向のレーザー走査が可能な1軸MEMSスキャナは、低速で垂直方向に走査する光学スキャナと組み合わせることで、コンパクトで低電圧駆動の表示機器を実現できる。

参考文献

- 1) H. Urey et al.: MEMS scanners and emerging 3D and interactive Augmented Reality display applications, *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, pp. 2485-2488 (2013).
- 2) K. Uchino: Piezoelectric actuators 2006, *J. Electroceramics*, Vol. 20, pp. 301-311 (2008).
- 3) S. Gu-Stoppel et al.: PZT-actuated and -sensed resonant micromirrors with large scan angles applying mechanical leverage amplification for biaxial scanning, *Micromachines*, Vol. 8, No. 7, p. 215 (2017).
- 4) I. Martini et al.: Andromeda: A Flexible MEMS Technology Platform for a Variety of Piezoelectrically Actuated Micromirrors, *2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 716-719 (2023).
- 5) H. -Y. Lin et al.: A Resonant Piezoelectric MEMS Mirror With 180-Degree Optical Scan Angle Under Atmosphere Pressure, *2023 22nd International Conference on Solid-State Sensors Actuators and Microsystems (Transducers)*, pp. 1417-1420 (2023).
- 6) K. Mihara et al.: High Driving Frequency (>54 kHz) and Wide Scanning Angle (>100 Degrees) MEMS Mirror Applying Secondary Resonance For 2K Resolution AR/MR Glasses, *2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS)*, pp. 477-482 (2022).