

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14219

研究課題名（和文）振動ブレ防止機構を備えたMEMSミラーによる移動機器向け小型LiDAR

研究課題名（英文）Development of a MEMS scanner integrated with an stabilizer for a compact LIDAR

研究代表者

岡本 有貴（Okamoto, Yuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：40880753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、自動車やロボットのような移動体上から計測しても振動によるブレがなく測距できる移動物体用小型Detection and Ranging(LiDAR)に用いる、ブレ防止機構搭載MEMSスキャナの開発である。研究期間全体を通しMEMSスキャナ構造の実現、XY面内駆動アクチュエータの実現とスキャナ構造の集積、MEMSスキャナの高性能化と小型化を達成し、計画通りに研究を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現した技術は、ジンバルのような大きな機構なしにブレ補正を行うことができ、移動体上での光スキャンの性能向上・小型化につながる。これは、自動移動ロボット(AMR)や自動運転車などからの長距離計測の高精度化をもたらし、ロボットの自己位置推定の高精度化・自動運転技術の高度化に必要なセンサ技術であると考えられる。また、研究の過程で実現した超小型MEMSスキャナ技術や非対称フレームによる2軸MEMSスキャナ技術はスキャナだけでなく、電磁駆動方向の機械的な変換や、複数アクチュエータによる連成振動の高度化といったMEMSアクチュエータ全体を進歩させるものである。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a MEMS scanner with an anti-vibration function for use in compact detection and ranging (LiDAR) systems for moving objects, which can measure distances from moving objects such as cars and robots without vibration-induced blurring. We achieved the realization of the MEMS scanner structure, the realization of the in-plane XY actuator, the integration of the scanner structure with the XY actuator, and the enhancement of the performance and miniaturization of the MEMS scanner. In conclusion, we were able to do the research as planned.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMSスキャナ MEMSミラー 圧電薄膜アクチュエータ 静電アクチュエータ 電磁駆動アクチュエータ LiDAR

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

Light Detection and Ranging (LiDAR) は、レーザー光を走査・計測して周囲の物体との距離を計測することができるセンサである。周囲を正確に認識できる LiDAR は、ロボットや自動運転における「目」としてさらに重要なものとなっており、距離や範囲に応じた複数の LiDAR を搭載する自動運転車等では、スペースの問題上小型化は必須である。一方、移動機器上からのセンシングでは振動によるブレが存在し、ブレ防止機構が小型化を阻んでいて数十 cm 四方になっていた。そこで、LiDAR 内部でブレ防止が行えれば小型化・cm オーダーの高解像度化が実現でき、ロボットの安定性や自動運転の安全性・精度の向上だけでなく、数 cm 四方の移動機器向け超小型 LiDAR の実現にも繋がる。

LiDAR は、主に(1) レーザー光源 (2) レーザー掃引機構 (3) 受光素子で構成される。次世代のレーザー掃引機構として、MEMS ミラーが特に注目・利用されている。MEMS ミラーは、微細加工技術によって薄膜ミラーとアクチュエータを集積した素子で、他掃引機構と比べ、最大 90 度以上と掃引範囲が大きく、少ない減衰でレーザーを走査できる。しかしながら、これまでの研究では MEMS ミラーの大振幅化・大口径化・高速化にのみ着目されており、ブレ対策には LiDAR に外部に大型のブレ防止装置を用いる必要があった。つまり移動体用小形・高精度 LiDAR 実現には、ブレ防止機構搭載 MEMS ミラーが不可欠であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、振動によるブレがなく計測できる移動物体用小形 LiDAR の実現である(図 2)。また、そのために、ブレ防止機構を搭載した MEMS ミラーを実現する。具体的には、静電引力アクチュエータによるマイクロステージ機構と、圧電薄膜アクチュエータによるミラー機構を集積した MEMS 素子を実現する。

LiDAR の性能に MEMS ミラーの性能は直結する。図 3 のように振動が加わると、従来の MEMS ミラーでは本来の計測対象からのズレが生じてしまう。従来の LiDAR では、このような振動ブレ対策にはセンサ外側にジンバルのような大きな安定装置を用いていた。一方で、LiDAR 構成要素のうち振動による影響を最も受けるのは MEMS ミラー部分であり、この部分で位置制御を行うことで振動ブレを解消できれば、外部安定装置を用いずに振動ブレでの対策ができるはずである(図 1)。本研究は、MEMS ミラー内部でのブレ防止機構に着目し、マイクロステージ機構を持つ MEMS ミラーを実現するという点で、従来の研究と一線を画しており、学術的創造性を有する。

MEMS ミラーはその重要性から広く研究されてきたが、LiDAR の計測範囲・精度の向上のための、大振幅化やミラー部分の大口径化、掃引の高速化についての研究しか行われていなかった。そのため、静電引力アクチュエータや圧電薄膜アクチュエータのような様々な種類のアクチュエータの利用検討は行なわれていたが、ミラー駆動を目的とした単体での利用がほとんどであった。そのため、面内方向の動作のみが着目されており、面内方向に動作するアクチュエータの利用や複数種類のアクチュエータの集積は考えられてこなかった。本研究では、面内方向動作に適した静電引力アクチュエータと、面外方向動作に適した圧電薄膜アクチュエータを集積し、MEMS ミラーにレーザー掃引機能だけでなく新たな機能を付加することを目的としている点で従来の技術とは異なり、MEMS 素子の研究としても学術的独自性を有する。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)2 軸 MEMS スキャナの開発 (2)マイクロステージ構造ブレ防止機構を持つ MEMS ミラーの開発について行った。

#### 「2 軸 MEMS スキャナの開発」

本研究の目的であるブレ防止機構内蔵 MEMS ミラーを実現するために、2 次元にレーザーを掃引できるスキャニングミラー構造を実現する。

#### 「マイクロステージ構造を持つ MEMS ミラーの開発」

静電引力アクチュエータによるマイクロステージ部分と、スキャニングミラー部分と s 集積した素子を開発する。静電引力アクチュエータは、対向する櫛歯構造間の引力より動作するもので、表面積に応じて力を大きくできるため、微細加工に適している。受けた振動に対して逆向きに静電引力を印可しミラー部分の位置を制御できる機構(マイクロステージ)を集積し、ブレ防止を

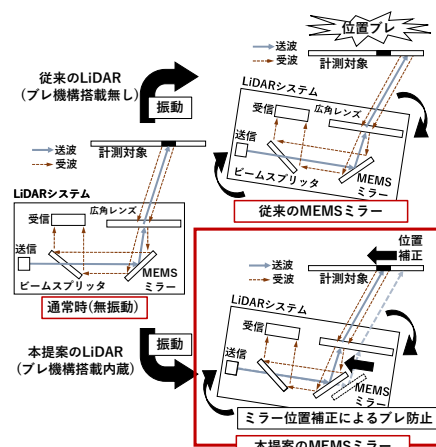


図 1: 提案する MEMS ミラー内蔵の位置補正機構による LiDAR の振動ブレ補正

行う。集積化によってミラー構成部分全体を薄膜化できるため軽量化でき、マイクロステージの動作を最大限活かすことができる。以上のように、XY 面内方向に位置制御ができるマイクロステージ機構の可動中心部に、2次元に走査できる MEMS ミラーを持つ構造を作製する。

#### 4. 研究成果

##### 「2軸 MEMS スキャナの開発」

初めに、2軸 MEMS スキャニングミラーの開発を行った。MEMS スキャナの動作手法には様々な原理に基づくものが存在するが、中でも電磁駆動型は構造の簡単さや駆動力の再現性の良さから広く適用可能されている。電磁駆動型 MEMS スキャナは通常、ローレンツ力を利用して回転モーメントを得ている。つまり、回転モーメントを得るには回転方向にあった外部磁界とそれに直交した電流が必要となる。そのため、電磁駆動方式で2軸回転を実現するには、回転する2方向いずれの磁界も必要であった。そのため、2軸 MEMS スキャナを実現するにはスキャナ素子の4辺全てに2組(4個)外部磁石を配置するか、素子を磁界に対し45度傾けて配置する必要があり、パッケージング面積を不必要に占有していた。

そこで、本稿では、図2(a)のように MEMS スキャナのジンバル部分を非対称構造にすることに着目し、1方向の磁界のみで2軸回転駆動を行う手法について実現し、非対称性により高周波数共振モードを利用する手法を開発した(図2(b), 3(c))。本手法によって2軸回転を1方向の磁界のみで実現することができ、外部磁石を基板に対して傾けることなく配線することができ、パッ

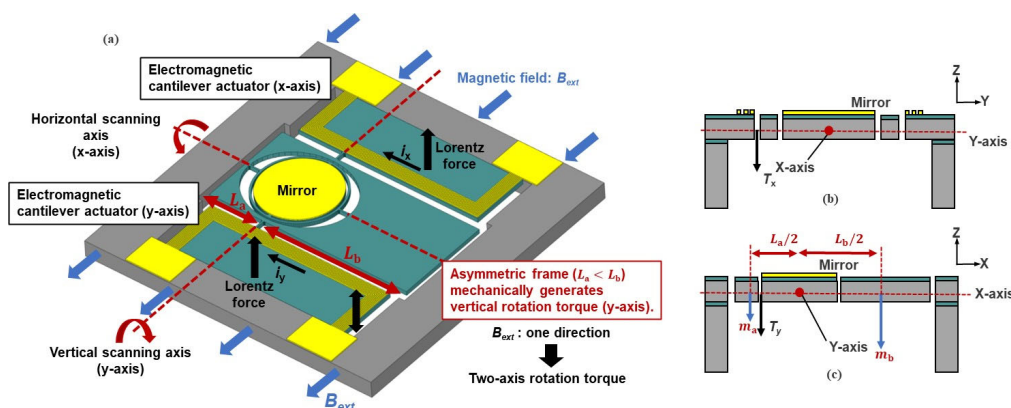


図 2: (a) 提案する非対称フレーム構造を利用した 2 軸回転 MEMS スキャナ。(b) X 軸方向回転モードの断面図。(c) Y 軸回転高周波数モードの断面図。

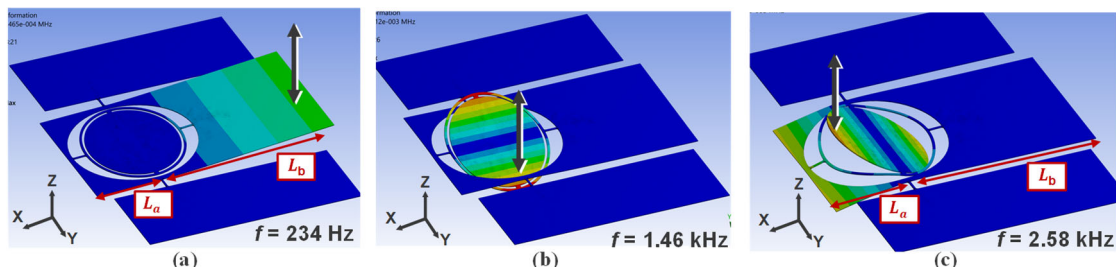


図 3: 有限要素解析結果。(a) Y 軸回転低周波数モード (b) X 軸回転モード (c) Y 軸回転高周波数モード。

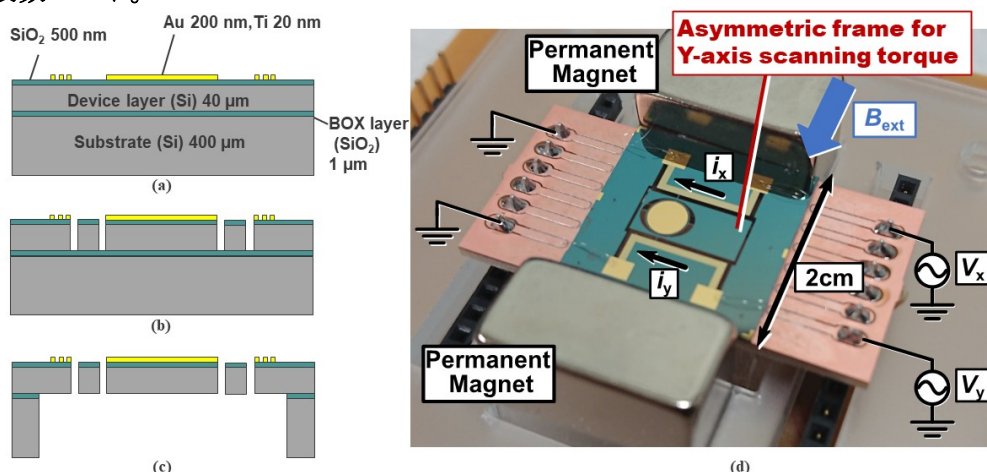


図 4: 作製工程。(a) 熱酸化・配線層を形成。(b) Si 活性層のパターニング。(c) 支持層の除去および埋め込み酸化膜除去によるリリース。(d) 作製した MEMS スキャナ。

ケーシング面積を削減することができる。

図 2(a) に作製したデバイスの構造を示す。素子サイズは  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  であり、ジンバル部分の軸からの長さを非対称に設定した ( $L_a < L_b$ )。また、外部磁石を磁界の向きに発生するように配置する。ジンバルの両端には駆動用の電磁駆動カンチレバー型アクチュエータを配置し、非対称フレームを介してミラー部分を回転させた。図 3 に有限要素解析結果を示す。非対称フレームにより、高速 Y 軸回転モードを共振モードが実現できていることがわかる。図 4 にプロセスフローを示す。に素子基板には活性層  $40\text{ }\mu\text{m}$  の SOI 基板を利用し、金電極をパターニングした後表面（活性層）のシリコンをパターニングした。さらに、裏面（支持層）のシリコンをエッチングした後 BOX 層の  $\text{SiO}_2$  をエッチングし、リリースした。図 4(d) に作製したデバイスを示す。300 mA の電流信号で 2 軸回転させた時の図を示す。X 方向は  $1.308\text{ kHz}$  で  $16.1^\circ$ 、Y 方向は  $2.568\text{ kHz}$  で  $4.84^\circ$  の回転角であった。

### 「マイクロステージ構造を持つ MEMS ミラーの開発」

次に、開発した非対称フレームを用いた 2 軸 MEMS ミラー技術を利用してマイクロステージ集積型 MEMS ミラーの開発を行った。振動ブレ補正機構は、CMOS イメージセンサの手ぶれ補正機構として MEMS を利用した構造も研究されており、XY 軸に移動する構造が提案・実現されている。このような 2 軸ステージ機構は、面外方向に動作するアクチュエータを利用するものと静電アクチュエータのような面内動作のみのアクチュエータで実現されるものがある。CMOS イメージセンサの補正においては面外方向動作型アクチュエータを使用しても問題無いが、MEMS スキャナの場合は意図しない面外動作を生じてしまう恐れがあるため適していない。また、既存の XY ステージ機構は中央の可動部に別途作製したチップを貼り付けて用いることを意図しており、動作変位や周波数の低下を招いてしまう問題があった。

図 5(a) に XY ステージ作製したデバイスの構造を示す。スキャナ部分については、非対称フレームによる電磁力 MEMS スキャナ構造を利用し、XY ステージ部分は静電歯槽アクチュエータ、ばね、フレームで構成されている。フレーム構造は 2 重の構造になっており、X 軸、Y 軸それぞれ別々に駆動することができる (図 5(b))。また、デバイス層のみで構成されるスキャナ部分よりも厚

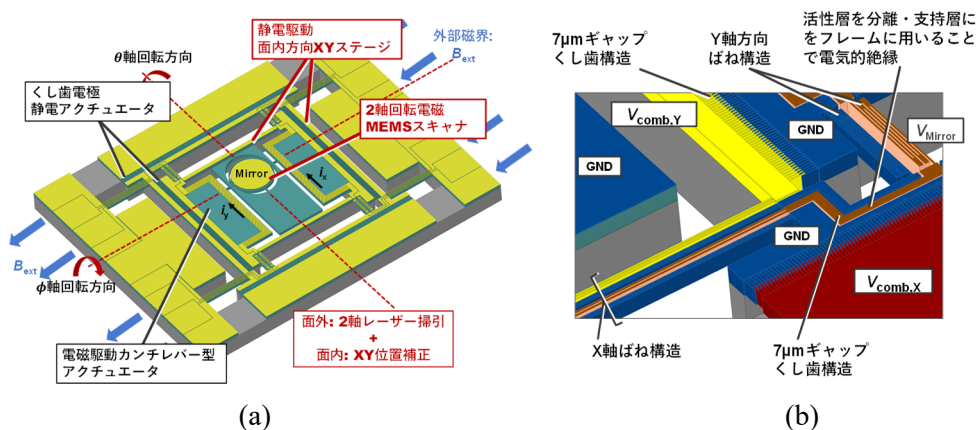


図 5: (a) 提案する XY ステージ補正機構集積 MEMS スキャナ概念図。(b) XY ステージ部分フレーム構造。

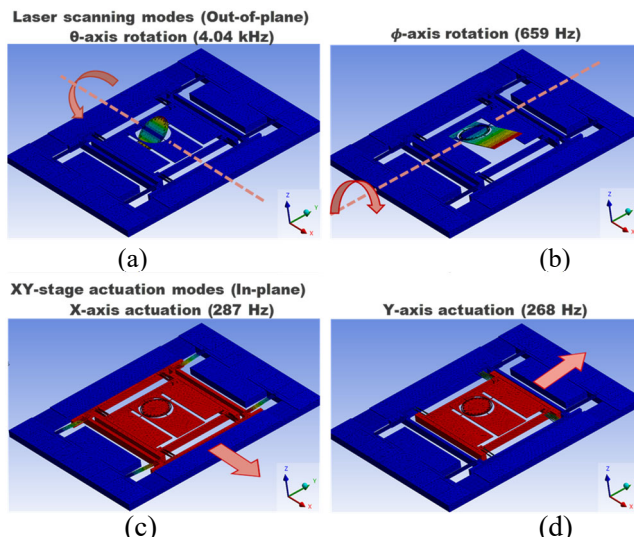


図 6: 有限要素解析結果。(a) 面外  $\theta$  軸回転 (b) 面外  $\phi$  軸回転レーザー掃引部分の面外共振動作 (c) ステージ部分の X 軸面内共振動作 (d) ステージ部分の Y 軸方向面内動作。

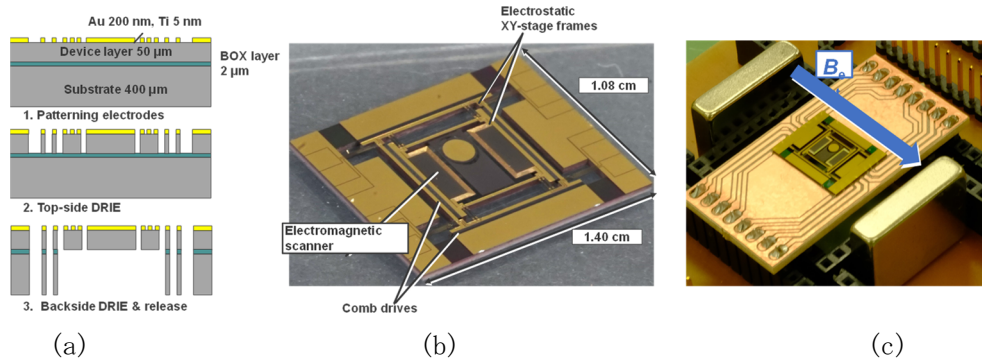


図7: 提案するデバイスのプロセスフロー。配線層を形成後、Si 活性層のパターニングし、支持層の除去および埋め込み酸化膜除去によるリリースする。(b) 作製したデバイス。(c) 外部磁石を配置しパッケージングしたデバイス。

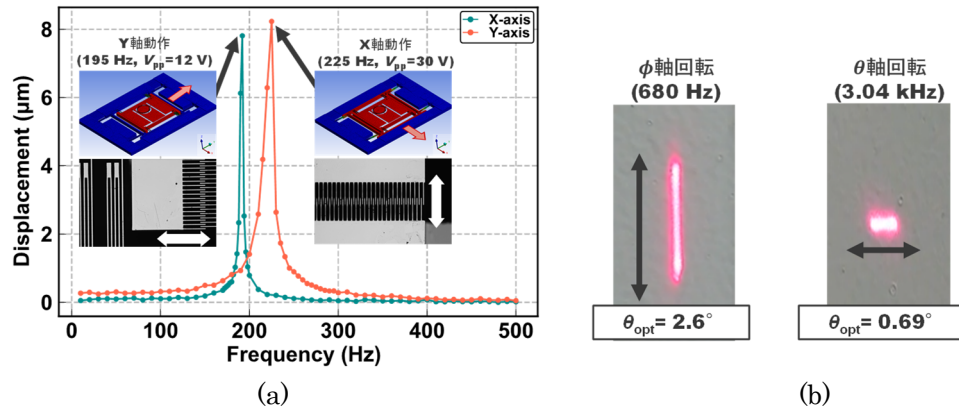


図8: (a) XY ステージ機構部分における静電アクチュエータのX軸,Y軸それぞれにおける周波数応答。(b)  $\phi$ 軸・ $\theta$ 軸それぞれの共振動作におけるレーザー掃引パターン。

くするために支持層も利用した構造となっている。素子サイズ  $1.8 \text{ cm} \times 1.1 \text{ cm}$  であり、ミラー径は  $1.6 \text{ mm}$  である。スキャナ部分とXY ステージ部分は物理的に絶縁されており、活性層と配線層で電圧を印加する。

図6に、ANSYS を利用した有限要素シミュレーションの結果を示す。この結果からも、面内方向動作と面外方向動作を分離出来ていることがわかる。

図7(a)に、作製したデバイスのプロセスフローを示す。素子基板には活性層  $50 \mu\text{m}$ 、埋め込み酸化膜  $2 \mu\text{m}$ 、支持層  $400 \mu\text{m}$  のSOI基板を利用した。まず、 $20 \text{ nm}$  のTi層と  $200 \text{ nm}$  のAu層をスパッタリングにより成膜した。次に、電極層を成膜、Ar イオンミリング装置によるパターニングを行って電極層を形成した。さらに活性層をDRIEによりパターニングし、裏面からDRIEを行うことで支持層のパターニングを行い、最後にCHF3プラズマで埋め込み酸化膜を除去することで可動構造のリリースを行った。図7(b)に実際に作製したデバイスを示す。図7(c)に示すように、素子の側面に1対の永久磁石を配置した

図8(a)にストロボスコープ計測装置 (Polytec 社製 MSA-500) を用いたX方向、Y軸方向の面内動作それぞれの周波数スペクトルを示す。XY ステージ構造部分の周波数特性を示す。X軸側は  $225 \text{ Hz}$  で、Y軸側は  $195 \text{ Hz}$  でそれぞれ変位が最大となった。加工パターンの限界上げね構造をX軸側とY軸側で変更する必要があったため、X軸側に  $30 \text{ V}$ 、Y軸側に  $12 \text{ V}$  印加したときほぼ同変位となった。また、レーザー掃引の結果を示す。 $\Phi$ 方向は  $680 \text{ Hz}$  で  $2.6^\circ$ 、 $\theta$ 方向は  $3.04 \text{ kHz}$  で  $0.69^\circ$  の回転角であった。図8(b)に実際に  $21 \text{ V}$  印加した時の掃引パターンを示す。

#### 「超小型圧電薄膜 MEMS ミラーの開発」

ブレ防止機構の集積化を行った際、スキャナ部分の面積を圧迫してしまうため、アクチュエータの面積を減らしてしまった。そこで、超小型構造でも十分な走査角が出せる圧電薄膜 MEMS ミラーの開発を行った。具体的には、PZT 圧電薄膜によるリング型アクチュエータとフォーク型アクチュエータという2種類のアクチュエータを用いた連成振動により、 $3.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$  の大きさで、 $27 \text{ kHz}$  で光学走査角  $40^\circ$  となる構造を実現した(図9)。今後は実現した構造を応用し、ブレ防止機構内のスキャナの性能を上昇させる。

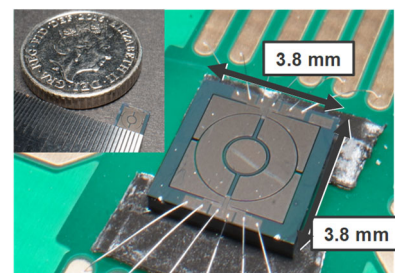


図9: 提案する位置補正可能なMEMSミラーによる振動ブレ防止機構搭載LiDAR

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okamoto Yuki, Okada Hironao, Ichiki Masaaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-Axis Electromagnetic Scanner Integrated with an Electrostatic XY-Stage Positioner	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MEMS49605.2023.10052600	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Yuki, Nguyen Thanh-Vinh, Okada Hironao, Ichiki Masaaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Via-Less Two-Axis Electromagnetic Scanner Using An Asymmetric Frame On A One-Axis Lateral Magnetic Field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS)	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MEMS51670.2022.9699696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Yuki, Gorwadkar Sucheta, Takei Yusuke, Okada Hironao	4. 巻 -
2. 論文標題 3.8×3.8 mm <sup>2</sup> Tiny Piezoelectric Resonant MEMS Scanner Using Fork-Shaped and Ring-Shaped Actuators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MEMS58180.2024.10439483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Yuki, Nakashima Rihachiro, Oda Ryo, Nguyen Thanh-Vinh, Takei Yusuke, Ichiki Masaaki, Okada Hironao	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-Axis Electromagnetic Scanner Using an Asymmetric Frame on a One-Axis Lateral Magnetic Field	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Microelectromechanical Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JMEMS.2024.3402211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Hironao Okada, Masaaki Ichiki
2. 発表標題 Two-Axis Electromagnetic Scanner Integrated with an Electrostatic XY-Stage Positioner
3. 学会等名 The 36th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本 有貴、岡田 浩尚、一木 正聡
2. 発表標題 1方向磁界駆動を可能とする電磁駆動2軸MEMSスキャナ
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamoto
2. 発表標題 Z-axis Controllable Multi-Electrode-Layer Electrorotation Device Utilizing Levitation Effect
3. 学会等名 The 17th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered & Molecular Systems (IEEE NEMS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Thanh-Vinh Nguyen, Hironao Okada, Masaaki Ichiki
2. 発表標題 Via-Less Two-Axis Electromagnetic Scanner Using An Asymmetric Frame On A One-Axis Lateral Magnetic Field
3. 学会等名 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Yusuke Takei, Thanh-Vinh Nguyen, Shinya Kano, Takeshi Kobayashi, Masaaki Ichiki
2. 発表標題 Pattern Reconfigurable Ultrasonic Sound Source Using Laser-Induced Graphene Interdigitated Electrode
3. 学会等名 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Sucheta Gorwadkar, Yusuke Takei, Hironao Okada
2. 発表標題 3.8×3.8 mm <sup>2</sup> Tiny Piezoelectric Resonant MEMS Scanner Using Fork-Shaped and Ring-Shaped Actuators
3. 学会等名 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 2次元走査型MEMSミラー	発明者 岡本有貴、岡田浩尚、一木正聡	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-001111	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 走査用ミラー装置	発明者 岡本有貴、ゲンタン ヴィン、岡田浩尚、一木正聡	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-213422	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 MEMSミラー素子	発明者 岡本有貴	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-222616	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------