

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05514

研究課題名(和文) 単一駆動部による多自由度MEMSスキャナの制御とそのデバイス応用

研究課題名(英文) Control and device application of multi-axis MEMS scanner by single driving apparatus

研究代表者

岩瀬 英治 (Iwase, Eiji)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：70436559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、支持梁の幾何形状を工夫することで各自由度に対する共振周波数をデザインすることにより、1対の支持梁および単一駆動部かつ1つの重畳制御信号のみで3自由度駆動可能なMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) スキャナの実現を目的とした。研究の結果、単一の磁場によるローレンツ力という単一の駆動機構および、3つの共振周波数を重ね合わせた1つの重畳駆動信号によって、各変形モードを独立かつ線形的に変位制御できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Our objective in this research is to realize a three-dimensional (3-D) operation of a Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) scanner with three resonant modes and a single driving apparatus by a single superposed signal with three frequencies. We fabricated a 3-D MEMS scanner with a single pair of beams having three resonant modes. We demonstrated the 3-D operation by a single driving apparatus using the Lorentz force. In addition, we have shown that the displacements are proportional to the voltage amplitudes of each resonant frequency in the superposed signal.

研究分野：マイクロマシン, MEMS

キーワード：マイクロマシン マイクロ・ナノデバイス MEMSスキャナ

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ミラーは光を走査する小型のデバイスであり、プロジェクタや内視鏡、共焦点顕微鏡、光スイッチなど応用は多岐にわたる。近年、3次元画像を投影できる内視鏡、3次元の映像を投影可能なヘッドマウントディスプレイやプロジェクタなどの3次元の画像や映像を扱う小型デバイスに応用が期待できるため、光スイッチにおいてのシグナルロスを防ぐために3自由度に駆動できるMEMSミラーについての研究が行われている。

一方で、従来の多くのMEMSミラーの駆動には自由度ごとに駆動機構と制御信号が必要である。例えば、従来の構造において3自由度MEMSミラーでは、3つの駆動機構と3つの制御信号が必要となることが多い。そのため、自由度の増加に伴い駆動機構や信号制御に必要な信号増幅器を含む光学系全体が複雑化してくるという問題が生じてしまう。そこで本研究では、1対の支持梁を用い、単一の駆動部に共振周波数を重ね合わせた1つの信号を入力することにより多自由度MEMSミラーの駆動を制御することを考えた。単一の信号によってMEMSを多自由度に駆動制御できるため、従来のMEMSミラーより小型化できるという利点を有する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、支持梁の幾何形状を工夫することで各自由度に対する共振周波数をデザインすることにより、1対の支持梁および単一駆動部かつ1つの駆動信号のみで3自由度駆動可能なMEMSスキャナを実現することである。本提案により、3自由度以上かつ小型・高開口率（ここでは、デバイス面積に対するミラー面積の占有割合のこと）のMEMSスキャナが実現可能となる。

### 3. 研究の方法

単一駆動部に対し1つの駆動信号による3自由度駆動を実現するための駆動機構に求める要件は、 $x$ 、 $y$ 軸回転方向および $z$ 軸並進方向の3方向への加振力を単一の駆動機構によって得られること、加えて、スキャナを使用する際には、設計値に対する実際の走査角・変位量のバランスを取る必要があるため、MEMSスキャナの製作後にも駆動力の比の調整が可能であることである。駆動方式は従来のMEMSスキャナに主に用いられる駆動方式では、静電駆動、圧電駆動、ローレンツ力駆動があるが、製作後の駆動力比の調整方法

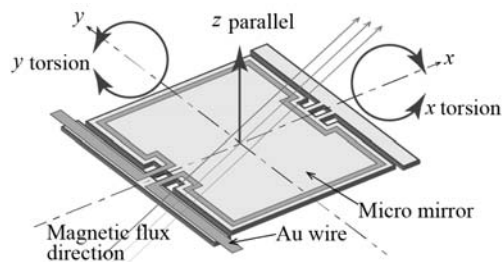


Fig. 1 本研究で用いた3自由度MEMSスキャナの概要図

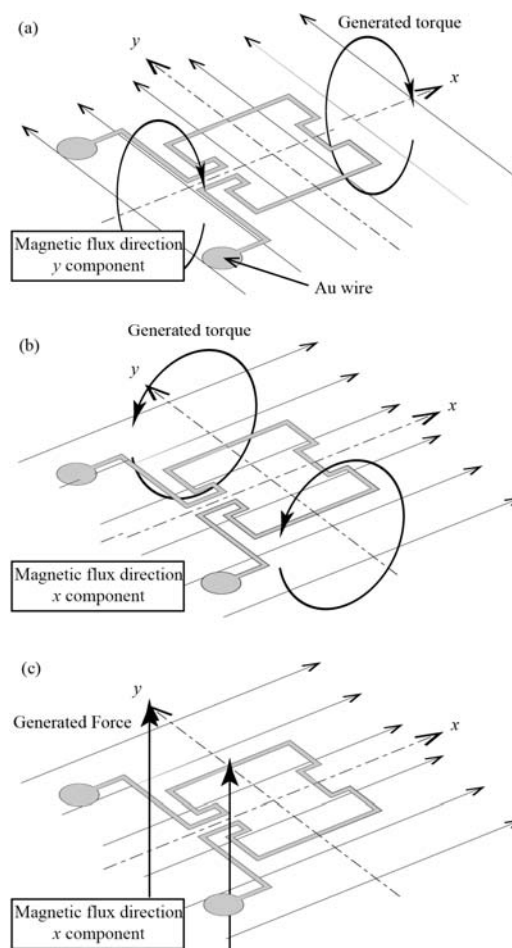


Fig. 2 ローレンツ力による3自由度駆動のための駆動トルクおよび駆動力の発生原理. (a) 磁場の $y$ 軸方向成分により発生する $x$ 軸周りのトルク. (b) 磁場の $x$ 軸方向成分により発生する $y$ 軸周りのトルク. (c) 磁場の $x$ 軸方向成分により発生する $z$ 軸方向の力.

の数についてローレンツ力に優位性があるため、本研究ではローレンツ力による駆動機構とした。Fig. 1に本研究で用いた、3自由度MEMSスキャナの概要図を示す。

配線を梁とミラー上に1重のコイルとなるように製作し、磁石は $x$ 軸に対して傾けて配置している。配線を貫く平行磁場に傾きを持

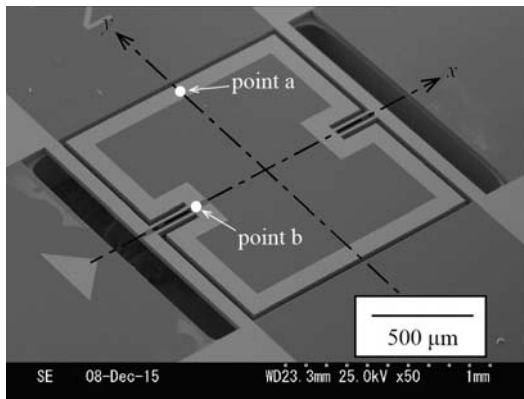


Fig. 3 製作した1対の支持梁を用いた3自由度MEMS スキャナのSEM 写真.

たせることによって、磁場は  $y$  軸に平行な成分と  $x$  軸に平行な成分の2種類の成分を持つこととなる. Fig. 2 (a), (b)および(c) にこの駆動機構によって発生する  $x$  軸回転,  $y$  軸回転および  $z$  軸並進方向の駆動力の概念図を示す.

MEMS スキャナの材料として、デバイス層 (Si) 30  $\mu\text{m}$ , Box 層 (SiO<sub>2</sub>) 2  $\mu\text{m}$ , ハンドル層 (Si) 250  $\mu\text{m}$  の SOI (Silicon on Insulator) ウェハを用いた. デバイス層表面に EB (Electron Beam) 蒸着装置を用いて密着層として Cr を 10 nm 蒸着した後, Au を 500 nm 蒸着した. スピンコートによってレジストを塗布後, フォトリソグラフィを用いて配線形状にパターンニングし, Au エッチングすることで配線を製作した. 更にも上にレジストを塗布し, 今回はスキャナの形状となるようにパターンニングし, ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching) を用いてデバイス層のエッチングを行った. ハンドル層も同様に加工し, 最後に Box 層をエッチングした. 製作した MEMS スキャナの SEM (Scanning Electron Microscope) 画像を Fig. 3 に示す.

磁場印加のために使用した永久磁石は株式会社マグナ社製の Nd-Fe-B 磁石 (ネオジム磁石) である. 外形は  $6 \times 6 \times 4.5$  であり, 表面磁束密度は 320 mT である. MEMS スキャナはの寸法は  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ , 厚さは 0.252 mm であるため, 6 mm 角の永久磁石の間では, ミラー面に対して十分平行な磁場ができていと考えられる. また製作した評価デバイスの抵抗値は全体 (スキャナ上配線, 導線) で 6.6~7.6  $\Omega$  であった.

面外変位の測定のためにレーザードップラー振動計 (MSA-500 ポリテック社製) を使用した. この測定系では, ある測定点での面外方向の変位速度を測ることが出来る. 測定点はミラー全面の任意の点を指定することができるため, 特徴的な点として Fig. 3 に示す  $y$  軸上の点 a と  $x$  軸上の点 b を計測した.

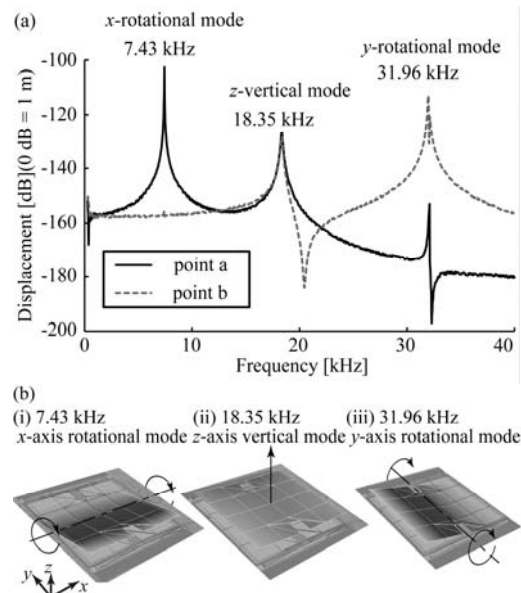


Fig. 4 (a) 3 自由度 MEMS スキャナの周波数特性 (計測点は Fig. 3 における点 a と点 b). 7.43 kHz, 18.35 kHz, 31.96 kHz の共振ピークはそれぞれ  $x$  軸回転モード,  $z$  軸並進モード,  $y$  軸回転モードである (b) 各共振周波数におけるミラーの変形.

#### 4. 研究成果

単一の加振機構を有する 3 自由度 MEM スキャナでの 3 自由度駆動特性を評価した. Fig. 4 に周波数特性の計測結果を示す. Fig. 4(a) は Fig. 3 の a 点, b 点の変位を計測したもので, Fig. 4(b) はそれぞれの周波数ピークにおける, MEMS スキャナの変形モードの計測結果であり, どちらもレーザードップラー振動計で計測した結果である. 7.43 kHz は  $x$  軸回転モードの共振周波数であり, 18.35 kHz は  $z$  軸並進モードの共振周波数である. また, 31.96 kHz は  $y$  軸回転モードの共振周波数であった.

次に1つの重畳駆動信号により 3 自由度駆動が可能かどうかの検証実験を行った. ここで重畳信号とは,

$$V(t) = V_x \sin(2\pi f_x t) + V_y \sin(2\pi f_y t) + V_z \sin(2\pi f_z t) \quad (1)$$

と, 共振周波数の正弦波信号を足し合わせた信号のことである. 3 自由度 MEMS スキャナは微小変形であることから, 式(1)のような重畳駆動信号により, 3 自由度を線形的に制御できることが期待できる. 「重畳駆動信号による線形的な制御」とは,  $x, y$  軸回転モードの回転角を  $\theta_x$  と  $\theta_y$ ,  $z$  方向変位の振幅を  $D_z$  としたとき, 変位  $\theta_x, \theta_y, D_z$  と, 式(1)の重畳駆動信号の各共振周波数の振幅  $V_x, V_y, V_z$  の間に

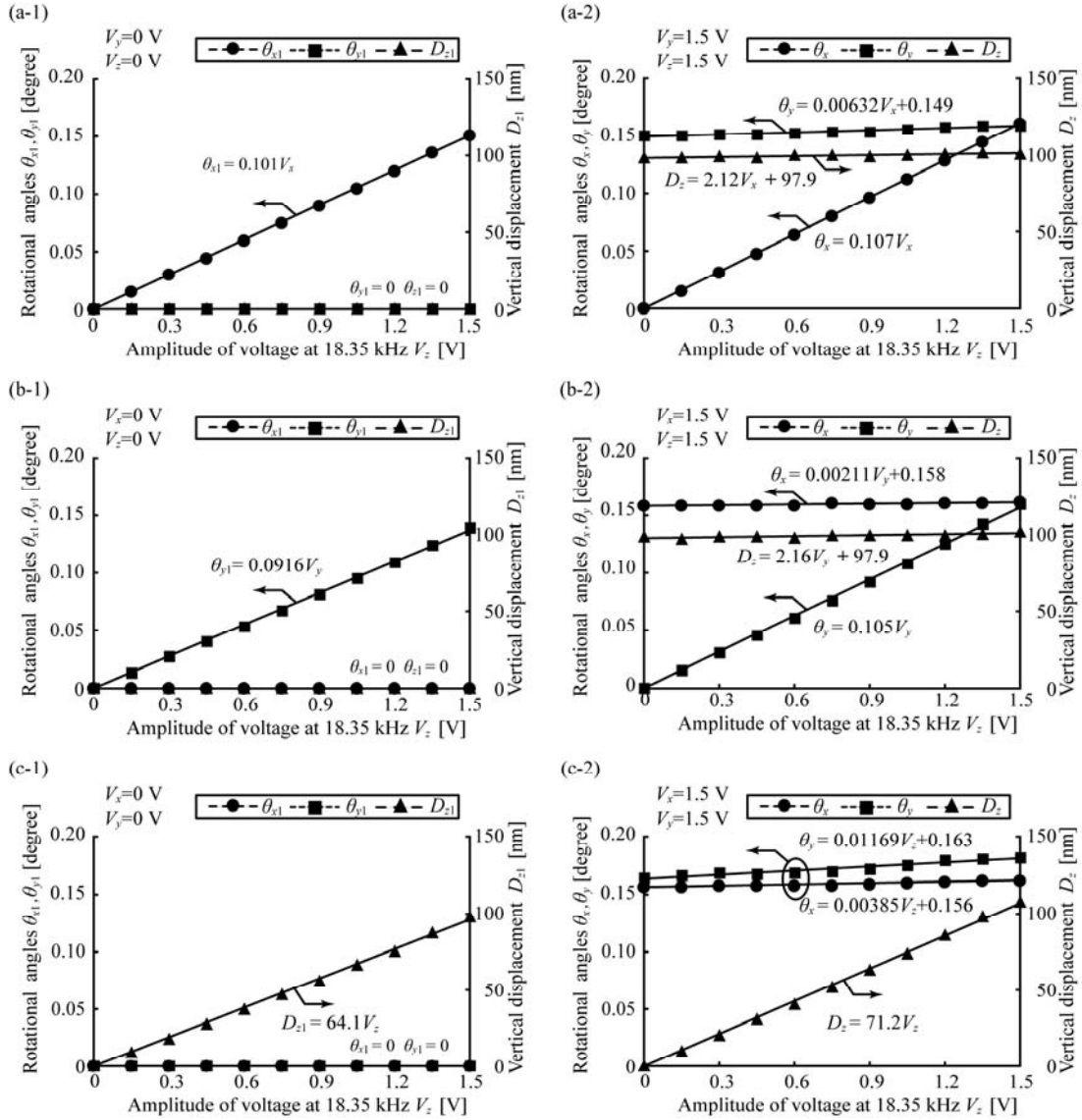


Fig. 5 重畳駆動信号による3自由度駆動の結果. 駆動印加電圧  $V$  は  $V(t) = V_x \sin(2\pi f_x t) + V_y \sin(2\pi f_y t) + V_z \sin(2\pi f_z t)$  のという形をしている.  $\theta_x$  ( $\theta_{x1}$ ),  $\theta_y$  ( $\theta_{y1}$ ) および  $D_z$  ( $D_{z1}$ ) はそれぞれ3自由度 (1自由度) 駆動における  $x$  軸,  $y$  軸回転角および  $z$  軸垂直変位. (a-1)  $V_x = 0$  V–1.5 V,  $V_y, V_z = 0$  V (1自由度駆動). (a-2)  $V_x = 0$  V–1.5 V,  $V_y, V_z = 1.5$  V (3自由度駆動). (b-1)  $V_y = 0$  V–1.5 V,  $V_x, V_z = 0$  V. (b-2)  $V_y = 0$  V–1.5 V,  $V_x, V_z = 1.5$  V. (c-1)  $V_z = 0$  V–1.5 V,  $V_x, V_y = 0$  V. (c-2)  $V_z = 0$  V–1.5 V,  $V_x, V_y = 1.5$  V.

$$\begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \quad \alpha, \beta, \gamma: \text{const.} \quad (2)$$

という関係が成り立つことである. 式(2)の行列の対角成分が定数かつその他の成分がゼロとなることが要点である. この「重畳駆動信号による線形的な制御」が可能であれば, 1つの信号により, 独立に各変形の変形量を変えることができるため, 駆動制御が非常に容易なシステムであるということが言える. Fig. 5に重畳駆動信号による3自由度駆動の結果を示す. 式(1)の重畳駆動信号における  $f_x, f_y, f_z$  は, Fig. 4の周波数特性計測から,  $f_x = 7.43$

kHz,  $f_y = 31.96$  kHz,  $f_z = 18.35$  kHzとしている. また, 磁場は  $x$  軸共振モードの走査角  $\theta_x$ , および  $y$  軸共振モードの走査角  $\theta_y$  が  $V_x = V_y$  の場合ほぼ同じ値を取るように  $x$  軸から  $5^\circ$  傾け配置した. レーザードップラー振動計により Fig. 3の点aおよび点bの最大変位を測定し, フーリエ変換することで, 各モードの最大振幅を計測した. Fig. 5は1つの重畳駆動信号を入力した際の各モードの変形量を示す.  $\theta_x$  と  $\theta_y$  及び  $D_z$  は, 3自由度駆動における  $x, y$  モード回転角及び  $z$  方向変位である.  $\theta_{x1}, \theta_{y1}$  および  $D_{z1}$  は, 1自由度駆動における各モードの変形量である. Fig. 5(a)は  $V_y, V_z$  が一定であり,  $V_x$  のみを変えた際の各モードの変位

量を示している. 1 自由度駆動の場合  $V_y=V_z=0$  V, 3 自由度駆動の場合  $V_y=V_z=1.5$  V である.  $\theta_x$  と  $\theta_{x1}$  が  $V_x$  に比例し, 比例定数が  $0.101$  °/V,  $0.107$  °/V である. また,  $V_x$  が  $0$  V と  $1.5$  V の際の  $\theta_y$  及び  $D_z$  の変形量の差がそれぞれ  $6.3\%$  と  $3.2\%$  であり,  $V_x$  にほとんど依存せず独立であるといえる. したがって,  $x$  軸回転モードの回転角  $\theta_x$  ( $\theta_{x1}$ ) は  $V_x$  にのみ比例し式(2)の比例定数  $\alpha$  は  $0.10$  °/V であると言える. 同様に, Fig. 5(b) から  $y$  軸回転モードの回転角  $\theta_y$  ( $\theta_{y1}$ ) は  $V_y$  にのみ比例し, 式(2)の比例定数  $\beta$  は  $0.10$  °/V, Fig. 5(c) から  $z$  軸並進モードの変化量  $D_z$ ,  $D_{z1}$  は  $V_z$  にのみ比例し式(2)の比例定数  $\gamma$  はおおよそ  $70$  nm/V であるといえる.

以上より, 1 対の支持梁を用いた 3 自由度 MEMS スキャナにおいて, 単一の磁場によるローレンツ力という単一の駆動機構および, 3 つの共振周波数を重ね合わせた 1 つの重畳駆動信号によって, 各変形モードを独立かつ線形的に変位制御できることを示した. 3 自由度と自由度の多い MEMS スキャナでありながら, 1 対の支持梁であるため, デバイス面積に対するミラー面積の占有割合の大きな高開口率とすることができ, また単一駆動機構, 1 つの重畳駆動信号による駆動からシステムの小型化が可能となる.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- [1] Toshiya Nagasawa, Yohei Oguchi, **Eiji Iwase**, “Operation of Three-Dimensional MEMS Mirror by Single Superposed Driving Signal,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 56, 06GN12 (5 pages), May 18, 2017. (査読あり)  
[DOI: 10.7567/JJAP.56.06GN12]
- [2] 小口陽平, 飯野知紗, **岩瀬英治**, “1 対の支持梁による 3 次元駆動 MEMS スキャナの形状設計,” *電気学会論文誌 E*, vol. 136, no. 10, pp. 448-453, October 1, 2016. (査読あり)  
[DOI: 10.1541/ieejsmas.136.448]

[学会発表] (計 5 件)

- [1] 黒澤蓮, **岩瀬英治**, “T 字型支持梁を有する 2 軸回転 MEMS スキャナにおける共振周波数比の設計,” *日本機械学会 関東学生会 第 57 回学生員卒業研究発表講演会*, 1203, 調布, 東京, March 16, 2018.
- [2] Toshiya Nagasawa, Yohei Oguchi, **Eiji Iwase**, “Operation of Three-Dimensional MEMS Mirror by Single Superposed

Driving Signal,” *Proceedings of the 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2016)*, 11P-11-119L, Kyoto, Japan, November 8-11, 2016.

- [3] 高橋悠人, **岩瀬英治**, “3 次元光走査のための単一 3 自由度ミラーおよびレンズを用いた光学系設計,” *平成 28 年電気学会 E 部門 総合研究会*, MSS-16-011, 金沢, 石川, June 29-30, 2016.
- [4] Yohei Oguchi, Chisa Iino, **Eiji Iwase**, “The Three-dimensional Actuation of the MEMS Scanner with Single Pair of Beams and Single Driving System,” *Proceedings of the 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015)*, 13D-10-2, Toyama, Japan, November 10-13, 2015.
- [5] 小口陽平, 飯野知紗, **岩瀬英治**, “1 対の支持梁による 3 次元駆動 MEMS スキャナの形状設計,” *第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム*, 30am2-PS-20, 新潟, 新潟, October 28-30, 2015.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: Micro Drive Device and Micro Device using Same

発明者: **Eiji Iwase**, Chisa Iino

権利者: Waseda University

種類: 特許

番号: US2017/0017074 A1

出願年月日: 2017 年 1 月 19 日

国内外の別: 国外 (米国)

名称: Micro Drive Device and Micro Device using Same

発明者: **Eiji Iwase**, Chisa Iino

権利者: Waseda University

種類: 特許

番号: CN106164741A

出願年月日: 2016 年 11 月 23 日

国内外の別: 国外 (中国)

[その他]

ホームページ等

<http://www.iwaselab.amech.waseda.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩瀬 英治 (Eiji Iwase)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号: 70436559