Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00122

Received date : 30 March, 2021

Accepted date : 3 August, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 13 August, 2021

MEMS 技術を応用したゼロコンプライアンス式微小力測定装置の開発

文字山 竜^{*1}, 水野 毅^{*2}, 石野 裕二^{*3}, 高崎 正也^{*2}

Development of MEMS-based micro-force measurement system with zero-compliance mechanism

Ryu MONJIYAMA^{*1}, Takeshi MIZUNO^{*2}, Yuji ISHINO^{*3} and Masaya TAKASAKI^{*2}

^{*1,*2,*3}Department of Mechanical Engineering, Saitama University
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan

Abstract

A miniaturized force measurement device with zero-compliance mechanism is designed and fabricated using MEMS technology. Zero-compliance mechanism consists of two suspensions connected in series through a detection point. When a force is applied to an object suspended by this mechanism, the position of the object can be kept constant by controlling the detection point. Furthermore, the force can be estimated from the displacement of the detection point because the displacement of the detection point is proportional to the force. The measurement method using zero-compliance mechanism is effective for measuring interatomic force, which is usually a function of the gap between objects. This work focuses on the miniaturization of this mechanism by MEMS technology. An experimental device is designed and fabricated. This device consists of comb-drive actuators, capacitance sensors using comb electrodes and leaf springs. It is experimentally confirmed that zero-compliance can be realized in such a miniature device fabricated using MEMS technology. In addition, measurement performances are improved in the device.

Keywords : Force measurement, Micro force, MEMS, Zero-compliance mechanism, Feedback control

1. 緒 言

バイオ, ナノ物質・材料等の研究領域では μN レベルや nN レベルの力計測が行われている (中尾他, 1995), (宮崎他, 1998). 一般的に力測定の一つとして, 物体の弾性変形を利用し, その力と変位の関係から測定を行う方法がある. 原子間力の測定では, カンチレバーによる力測定が用いられている (Binning et al., 1986). この方法では, 高分解能を実現するためには, 測定系の剛性を低くする必要がある. しかし, 低剛性とする, 力が作用点に働いたときに生じる変位が大きくなり, 力の発生源と作用点の距離などの測定条件が変わってしまう. このことは, 原子間力のように, 物体間の距離に依存する力を測定する際に問題になると考えられる. 一方で作用点を一定に保ちつつ, 力を測定する方法としてサーボ系を構成して, 作用点変位に対し状態フィードバックを施す方法がある (Boyden et al., 1985), (Sawada et al., 1994), (Jones et and Schoonover, 2002). この方法であれば, 少なくとも定常状態では作用点変位は変化しないため, 力の発生源との距離を管理しつつ測定を行うことができる. しかし, 測定帯域を広げるためにはハイゲインフィードバックが必要である. ゲインが大きくなると, 操作量に含まれるノイズの影響が大きくなるので, 測定感度が低下してしまうと考えられる.

これらの問題を解決することを目標として、著者らはゼロコンプライアンス機構による微小力測定を提案している (水野他, 2011). このゼロコンプライアンス機構は、二つのばねが検出点を介して直列に接続された構造となっており、一方は正のばね特性を、もう一方は負のばね特性を持っている. 作用点に力が加わると一方は伸び、もう一方が縮むため、両者の絶対的な変形量が等しければ、構造全体の長さは変化しない. 一方で検出点の変位は変化するため、ばねのパラメータを適切に設計することによって、高剛性（無限剛性）と高感度の両立が可能となる可能性がある. すなわち、力の発生源と作用点の距離などの測定条件を変えずに、高感度な力測定が実現できる可能性があると考えられる. また、感度は、基本的にばねの剛性の大きさに決まるので、ハイゲインフィードバックを加えても低下しないことが期待される.

そこで、著者らは、直列二自由度磁気浮上 (水野他, 2010) を利用したゼロコンプライアンス機構を備えた微小力測定装置を開発した (水野他, 2014). この装置では電磁石と板ばねにより、正のばね剛性を持つ支持機構を、永久磁石の吸引力特性を利用して負のばね剛性を持つ支持機構を実現している. この実験装置を用いて力測定実験が行われ、力に対し作用点変位は一定位置を保っているのに対し、検出点が線形的に変化していることが確認された. また、この装置による力測定の分解能はサブ mN 程度であった. また、検出点変位から力を推定した結果と制御信号から力を推定した結果を比較すると、検出点変位から力を推定した方が精度が高いことが確認された. これらの結果から、測定対象との距離を一定に保ちつつ、高分解能な測定が実現できる可能性が示された.

ゼロコンプライアンス機構を用いた微小力測定を原子間力などの測定に応用することを考えると、力検出部の微細化が必要である. そこで本研究では MEMS (Micro Electro Mechanical System) を製作する際に用いられる微細加工技術を応用し、ゼロコンプライアンス式微小力測定装置の開発を行う. これにより、ゼロコンプライアンス式微小力測定性能の向上が期待される. なお、カンチレバーを利用した力測定において、カンチレバー先端の位置・姿勢を保つためには、3 自由度のゼロコンプライアンス機構が必要となる (Mizuno et al., 2020) が、このような機構を製作する場合にも MEMS 技術は有効であると考えられる.

2. 原 理

2・1 ゼロコンプライアンス機構

ゼロコンプライアンス機構は、図 1 に示されているように、二つの質点 m_1 , m_2 にばね定数 k_{s1} , k_{s2} のばねが直列接続された構造となっている. ここで m_1 , m_2 をそれぞれ検出点、作用点と定義し、それぞれの変位を y_1 , y_2 とする. この機構の合成ばね定数 k_{sc} は、次式で与えられる.

$$k_{sc} = \frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1} + k_{s2}} \quad (1)$$

ここで負のばね定数を実現できるとし、 $k_{s1} = -k_{s2}$ とすると、合成ばね定数 k_{sc} は次式のように求まる.

$$|k_{sc}| = \infty \quad (2)$$

このとき、作用点に外力 w が加わると、検出点と作用点の変位 y_1 , y_2 は、次式のように求まる.

$$y_1 = \frac{w}{k_{s1}} = -\frac{w}{k_{s2}} \quad (3)$$

$$y_2 = 0 \quad (4)$$

Fig. 1 Principle of zero-compliance mechanism. Zero-compliance mechanism consists of two suspensions connected in series through a detection point. One spring has positive stiffness and the other has negative stiffness. When a force is applied to the point of force, one spring extends and the other spring contracts. When the amount of deformation cancels each other, the position of the point of force is maintained at the original position. On the other hand, the displacement of the detection point varies proportionally to the force.

力に対し，作用点は変位せず，検出点は線形的に変化する．よって，測定対象との距離を一定に保ちつつ，検出点の変位より力を測定することができる．また，検出点の変位は，ばね定数 k_{s1} ， k_{s2} によって決まるため，この絶対値を小さくすることで，高分解能力測定を行うことができる．

2・2 ゼロコンプライアンス機構の実現方法

2・1 節のゼロコンプライアンス機構の原理説明において，負のばね定数を仮定していたが，単純な負のばね定数の支持機構を使用すると，系全体が不安定になってしまうため，少なくとも一つの支持機構は能動形にする必要がある（水野他, 2011）．ゼロコンプライアンス機構を用いた微小力測定装置は以下の観点により分類することができる．

- ・ 能動型支持機構の配置
- ・ アクチュエータの種類
- ・ 正のばね定数，負のばね定数の位置
- ・ 制御方法

1 章で示したゼロコンプライアンス機構は，支持機構に板ばねと永久磁石の吸引力を利用しており，検出点変位を電磁石により制御することによって固定部と検出点の間の支持機構を能動形にしている（水野他, 2011）．また，先行研究では他にもアクチュエータに圧電素子やボイスコイルモータを用いたものや支持機構にカンチレバーを用いた装置なども開発されている（高林他, 2013），（Nahiyan et al., 2019）．

また，ゼロコンプライアンス機構を実現するために以下のような制御方式が考えられる（水野他, 2011）．

- (a) 正負の剛性を一致させる制御（剛性制御）
- (b) 作用点変位に関する積分補償を含む制御（積分制御）
- (c) 変位相殺制御

本研究では(b)の積分制御を用いて，ゼロコンプライアンス機構を実現する．図2のように固定部と検出点の間の支持機構と並列にアクチュエータにつなぎ，作用点変位に対してPID制御，検出点変位に対してPD制御を施すことによって任意の極配置が可能となる（水野他, 2014）．閉ループ系が安定になるようにされているとき，式(5)のようなステップ外乱に対する検出点変位と作用点変位は，それぞれ式(6), (7)のように表される（水野他, 2010）．

$$W(s) = \frac{W_0}{s} \quad (W_0 : \text{const}) \quad (5)$$

Fig. 2 A configuration of zero-compliance mechanism. To achieve zero compliance, stably an active suspension is necessary.

$$y_1(\infty) = -\frac{W_0}{k_1} \quad (6)$$

$$y_2(\infty) = 0 \quad (7)$$

よって、式(3), (4)の結果と一致しゼロコンプライアンス機構が実現できることが分かる。また、検出点と作用点の相対変位は次式のように求まる。

$$y_2(\infty) - y_1(\infty) = \frac{W_0}{k_2} \quad (8)$$

式(8)より、検出点と作用点のギャップは大きくなっているため、検出点は力の向きと反対方向に変位する。よって、検出点と作用点をつなぐばねは正の剛性、固定部と検出点をつなぐばねは負の剛性を持つような挙動を示すことがわかる。

3. 装置設計

3・1 MEMS

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは微小な構造体や電子回路、センサ、アクチュエータを一体化、集積化したシステムである。MEMS デバイスの特徴は小型化、一体化 (集積化)、量産性にあり、幅広い応用分野で重要な部品として用いられる (江刺, 2011)。加速度センサ、圧力センサや医療デバイスへの応用もされている (庄子, 2008), (江刺, 2009)。本研究では、ゼロコンプライアンス機構に必要である、アクチュエータ、センサ、ばね要素を MEMS 技術を用いて製作する。その方法について次節から述べる。

3・2 MEMS プロセス

Si 基板(支持基板)の上に SiO₂ 層(犠牲層)を形成し、さらにその上に Si 層(デバイス層)を形成した SOI 基板を用いて MEMS の製作を行った。デバイス層は構造物が形成される所であり、犠牲層は支持基盤とデバイス層を絶縁する役割がある。この SOI 基板を用いた MEMS は、大まかに以下の工程で製作される

(P1) レジストの塗布

レジストと呼ばれる有機膜をデバイス層の Si に塗布する。

(P2) 電子線描写装置で構造物の形状を描写 (リソグラフィ)

電子線描写装置を用いて、(a)の工程で塗布したレジストに電子線を照射する。電子線が照射されたレジストは化学反応が生じる。これにより、化学反応が生じた部分と化学反応が生じなかった部分ができる

め、どちらか一方を除去することにより、最終構造の形にレジストがパターニングされる。

(P3) Si 層の除去 (DRIE : Deep Reactive Ion Etching)

深掘りの反応性イオンエッチング(Deep Reactive Ion Etching)を用いて、デバイス層の Si の除去を行う。

(P4) SiO₂ 層の除去 (リリース)

犠牲層のエッチングを行うことにより、構造物のリリースを行う。これにより、構造物が可動となる。

3・3 板ばね

ばね要素を構成するために、図 3(a)のような板ばねを用いた。この板ばねのばね定数を求める。ばねは、8 枚の板から構成されていると考える。まず、図 3(b)に示すように、一枚の半分の長さの片持ち梁を考えると、梁の先端部に力 F が加わった時の梁先端の変位量 y は次式のように求まる。

$$\begin{aligned} y &= \frac{L^3}{3EI} F \\ &= \frac{4L^3}{a^3 b E} F \quad (\because I = \frac{a^3 b}{12}) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 a は板ばねの厚さ、 b は板ばねの幅、 L は板ばねの半分の長さ、 E は縦弾性係数、 I は断面二次モーメントである。式(9)より、この片持ち梁の剛性 k は $a^3 b E / 4L^3$ N/m と求めることができる。板ばね全体は、長さ L の板、16 枚をつなぎ合わせてできていると考え、それぞれが同様に撓むとする。図 3(c)に示すように、片持ち梁を 2 枚直列に接続し、それらを並列に接続したばねの剛性は k となる。板ばね全体は、さらにこれを四つ組み合わせ構成されるが、直列接続したばねを並列接続することになるので、板ばね全体の剛性も k と一致する。よって、長さ L の片持ち梁を考えることにより、板ばね全体の剛性を求めることができる。一方で、片持ち梁の x 方向変位は、組み合わせられたばねでは、左右対称な構造のため、相殺されるので、無視することができる。また、 z 方向の剛性は、 y 方向の剛性の a と b を入れ替えたものとなるので、 y 方向の剛性の b^2/a^2 倍となり、 a の値を b の値に対して大きくすることで、 z 方向の剛性を高くすることができる。具体的には、 $a=4\mu\text{m}$ 、 $b=20\mu\text{m}$ としたので、 z 方向の剛性は y 方向の剛性の 25 倍となる。よって、 y 方向の剛性のみ低くなり、装置の動作を一自由度に制限することができる。

3・4 静電容量センサ

変位を測定するためのセンサとして、静電容量センサを用いる。静電容量センサとは測定対象の物量に関係して変化する、静電容量を読み取ることによって、目的の物理量を取得するセンサの事である。図 4 に示すような

Fig. 3 Schematic drawing of leaf spring.

櫛歯型電極を使い，静電容量センサを製作する．櫛歯片面当たりの静電容量 C を考えると次式のように求まる．

$$C = \frac{\varepsilon_0(b-|z|)(Y_0+y)}{d-x} \quad (10)$$

ここで b は電極の幅， d は電極間のギャップ， ε_0 は真空の誘電率， Y_0 は初期状態の電極の重なっている距離である． x 軸は電極間のギャップが小さくなる向きを正， y は電極どうしが重なる面積が大きくなる方向を正としている．また，電極の頂点とその対抗面の静電容量，フリンジ電界は無視した．3.3 節で用いた板ばねを用いて，この櫛歯型電極の自由度を y 方向のみに拘束するため， x, z 方向の変位を無視すると式(10)は次式のようになる．

$$C = \frac{\varepsilon_0 b(Y_0+y)}{d} \quad (11)$$

もう一方の面を考えると静電容量は 2 倍になる．これらの櫛歯が N 本あるとすると櫛歯全体の静電容量 C_{comb} は式のように表される．

$$C_{comb} = \frac{2\varepsilon_0 Nb(Y_0+y)}{d} \quad (12)$$

よって， y 方向の変位に対し，線形的に静電容量が変化する．この櫛歯型電極の静電容量を Capacitance-to-Digital converter (CDC) という IC (PCap02; ams) を用いて測定することによって，装置駆動部の変位を測定する．

3・5 櫛歯型静電アクチュエータ

MEMS で用いられるアクチュエータとして，櫛歯型静電アクチュエータがある．これは 3.4 節で用いた櫛歯型電極に電圧を印加し，電極間に生じる静電力を駆動力とするアクチュエータである．このアクチュエータの発生力を求める．電圧 V を電極に印加した時を考えると，櫛歯片面当たりの静電エネルギー U は，式(10)を用いて，次式のように求まる．

$$U = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{\varepsilon_0(b-|z|)(Y_0+y)}{d-x} \quad (13)$$

Fig. 4 Schematic drawing of comb electrode.

各方向に働く力 $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ は、求めたい方向に対し偏微分すればよいので、次式のように求まる。

$$\begin{aligned}\vec{F} &= \left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z} \right) \\ &= \left(\frac{\varepsilon_0(b-|z|)(Y_0+y)}{2(d-x)^2} V^2, \frac{\varepsilon_0(b-|z|)}{2(d-x)} V^2, -\text{sgn}(z) \frac{\varepsilon_0(Y_0+y)}{2(d-x)} V^2 \right)\end{aligned}\quad (14)$$

関数 sgn は符号関数である。3.4 節と同様に、この櫛歯型電極の自由度を y 方向のみに拘束するため、 x, z 方向の変位を無視すると式(14)は次式のようになる。

$$\vec{F} = \left(\frac{\varepsilon_0 b(Y_0+y)}{2d^2} V^2, \frac{\varepsilon_0 b}{2d} V^2, -\text{sgn}(z) \frac{\varepsilon_0(Y_0+y)}{2d} V^2 \right) \quad (15)$$

もう一方の面を考えると y 方向と z 方向の力は 2 倍になり、 x 方向の力は向きが反対のため、合力は 0 となる。これらの櫛歯が N 本あるとすると櫛歯全体の発生力 F_{comb} は次式のように求まる。

$$\vec{F}_{comb} = \left(0, \frac{\varepsilon_0 N b}{d} V^2, -\text{sgn}(z) \frac{\varepsilon_0 N(Y_0+y)}{d} V^2 \right) \quad (16)$$

ここで、駆動部の変位方向である、 y 方向の力に着目すると、変位によらず、電圧の二乗に比例した力を発生できることがわかる。よって、櫛歯型電極に印加する電圧を制御することにより、アクチュエータの発生力を制御することが可能である。

4. 実験装置

4・1 実験装置

3 章で説明した板ばね、センサ、アクチュエータを組み合わせることによって、装置の設計、製作を行った。実験装置の全体図と物理モデルを図 5、制御系を含めた装置全体のブロック線図を図 6、アクチュエータ、センサ部である櫛歯型電極を図 7、板ばねを図 8、検出点・作用点となる部分を図 9 に示す。これらの図は光学顕微鏡を用いて撮影した。なお、図 5 の全体図（左側の図）としては、櫛歯型電極などを見やすくするために、静電容量センサ c_2 への配線を行っていない時の写真を示している。また、作用点に作用する力（測定対象）は、静電アクチュエータ $\hat{k}_{v2}$ によって与えている。

本研究で製作した装置では板ばねが三つある。2 章のゼロコンプライアンス機構の原理説明ではばねが二つとなっていたが、対称性を持たせるために作用点と固定部をつなぐばねを製作した。このばねは、作用点の運動を 1 自由度に拘束する役割も果たしている。ここで、図 5 に示した物理モデルについて次式のような運動方程式が成り立つ。

$$m_1 \ddot{y}_1 = -k_{s1} y_1 - k_{s2} (y_1 - y_2) + F_{comb} \quad (17)$$

$$m_1 \ddot{y}_2 = k_{s2} (y_1 - y_2) - k_{s3} y_2 + w(t) \quad (18)$$

ここで、 m_1, m_2 は検出点、作用点の質量、 y_1, y_2 は検出点、作用点の変位を表し、図 5 の下向きを正としている。また、 k_{s1}, k_{s2}, k_{s3} は板ばねの剛性、 F_{comb} は櫛歯型静電アクチュエータ発生力、 $w(t)$ は作用点に働く外力

(測定対象の力) である。平衡状態近傍において線形近似すると、櫛歯型静電アクチュエータの発生力 F_{comb} は次のように表される。

$$F_{comb} = k_a \hat{k}_{v1} \hat{u} \quad (19)$$

Fig. 5 Photo and model of experimental device. The experimental device consists of leaf springs, comb-drive actuators, and comb electrodes. There are two comb-drive actuators. One is used to generate measuring force. The other is used to control movable part. The displacement of the movable part is measured from the capacitance of the comb electrode that changes with the displacement of the movable part.

Fig. 6 Block diagram of control system for zero-compliance mechanism. The integral control is solely applied to the point of force because the sampling time for capacitance measurement of the comb tooth electrode is not short.

Fig. 7 Enlarged photo of comb-shaped electrode.

ここで、 k_a は反転増幅回路のゲイン、 $\hat{u}$ は楕歯型静電アクチュエータの制御電圧、 $\hat{k}_{v1}$ は平衡状態近傍において線形近似したときの楕歯静電アクチュエータの特性係数で、電圧と力の比を表している。図 6 に示すような制御を施すと、制御電圧 $\hat{u}$ を以下のように表すことができる。

$$\hat{U}(s) = -\frac{q_I}{s} Y_2(s) \quad (20)$$

ここで、 q_I は積分フィードバックゲインである。各変数のラプラス変換を大文字で表している。式(17)～(20)より、検出点と作用点の変位はそれぞれ次のように与えられる。

$$Y_1(s) = \frac{k_{s2}s - k_a \hat{k}_{v1} q_I}{\hat{t}_c(s)} W(s) \quad (21)$$

$$Y_2(s) = \frac{m_1 s^3 + (k_{s1} + k_{s2})s}{\hat{t}_c(s)} W(s) \quad (22)$$

ここで、

$$\hat{t}_c(s) = m_1 m_2 s^5 + (m_1(k_{s2} + k_{s3}) + m_2(k_{s1} + k_{s2}))s^3 + (k_{s1}k_{s2} + k_{s2}k_{s3} + k_{s3}k_{s1})s + k_{s2}k_a \hat{k}_{v1} q_I \quad (23)$$

である。作用点に働く力 $w(t)$ がステップ関数の場合を考えると次式のように表される。

$$W(s) = \frac{W_0}{s} \quad (W_0 : \text{const}) \quad (24)$$

このとき、閉ループ系が安定であるとする、定常状態における検出点と作用点の変位は次式のように求まる。

$$y_1(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_1(s) = -\frac{W_0}{k_{s2}} \quad (25)$$

$$y_2(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_2(s) = 0 \quad (26)$$

Fig. 8 Enlarged photo of leaf spring.

よって、2章のゼロコンプライアンス機構の結果と同様になり、作用点と固定部をつなぐばねがあってもゼロコンプライアンス機構を実現することができ、力の測定には影響ないと考えられる。

図9は板ばね部となっており、板ばねの厚さ a は $4\mu\text{m}$ 、板ばねの幅 b は $20\mu\text{m}$ 、板ばねの半分の長さ L は $400\mu\text{m}$ とし、剛性が 0.95N/m となるように設計を行った。また、板部ばねの幅と電極の幅とは、SOI基板のデバイス層の厚さによって決まるため、それぞれ等しくなっている。

図9は検出点となる箇所を示しており、作用点も同様の構造をしている。図中の規則的に並んでいる四角の所はリリースホールと呼ばれる穴である。これはMEMSプロセスの都合によるもので、3章で説明した、デバイス層のSiをリリースする工程で SiO_2 を除去するためである。このリリースホールがないと固定部の方が駆動部よりも先にリリースされるため、リリースホールを設けることにより、駆動部の下の SiO_2 を除去しやすくし、駆動部のみをリリースできるようにしている。

また、実験より求めたパラメータを表1に示す。全体的に設計値よりも実験から求めた値の方が小さくなっていることがわかる。この原因について考察する。3.1節で説明したMEMS製作工程の(P3)において、Si層を除去するのに深掘りエッチングが行われる。このとき、図10に示す工程を繰り返すことによって垂直に加工を行って

Fig. 9 Enlarged photo of detection point.

Table 1 Parameters of the experimental device.

Parameter	Design value	Measured value	Ratio
k_{s1}	0.951 N/m	0.424 N/m	44.6%
k_{s2}		0.445 N/m	46.8%
k_{s3}		0.485 N/m	51.0%
k_{v1}	10.62 nN/V ²	8.68 nN/V ²	81.7%
k_{v2}		8.80 nN/V ²	82.9%
c_1	42.48 fF/μm	31.9 fF/μm	75.1%
c_2		33.0 fF/μm	77.7%

Fig. 10 Method of silicon etching (DRIE). First, the silicon is isotropically etched. Next, the surface is passivated. Finally, the bottom of the oxid film is broken by ion bombardment. By repeating this process, silicon is etched only in the vertical direction.

Fig. 11 Shape of silicon after etching.

いく．まず，等方的にエッチングした面に対し C_4F_4 （気体）を投入することで，保護膜を生成する．次にイオン衝撃により底面を開口し，そこからさらに等方的に Si をエッチングすることを繰り返す．したがって，加工後の側面は図 11 のように凹んだ面を繰り返した形となっている．この食い込み量はおよそ $0.2 \sim 0.5 \mu m$ となる（三田，2018）．板ばねの厚さが $1 \mu m$ （両側 $0.5 \mu m$ ずつ）小さくなったすると，板ばねの厚さが $3/4$ になる．ばね定数は，厚さの 3 乗に比例するので，設計値の約 42% になる．

また，櫛歯型電極の幅が同様に小さくなると，電極間のギャップが 1.5 倍になる．櫛歯型電極の特性係数 c_1 ， c_2 と櫛歯型静電アクチュエータの特性係数 k_{v1} ， k_{v2} はギャップに反比例するので設計値の約 67% になる．これらを考慮すると，パラメータの測定結果は妥当な結果であると考えられる．実際に光学顕微鏡で板ばねと電極の幅を測定したところ，板ばねの厚さは片側 $0.4 \mu m$ 程度，電極幅は $0.3 \mu m$ 程度小さくなっていることが確認できた．

しかしながら，設計に対する誤差がこのような範囲に収まっていれば，設計した構成に対する仮定（数式展開）は保たれると考えられる．また，式(27)からわかるように，ばね定数が小さくなると変位が大きくなり，分解能が向上すると考えられるので，この装置を用いて実験を行った．

4・2 実験システム

実験システムを図 12 に示す．また，実験システムのブロック線図を図 13 に示す．位置によって変化する櫛歯型電極の静電容量を CDC により測定し，その結果をマイクロコンピュータで読み取り，制御電圧の計算を行う．その出力を反転増幅回路に入力し，その出力電圧を櫛歯型静電アクチュエータに印加することで装置全体の制御を行う．

5. 実験結果

製作した実験装置の作用点に積分制御を施し，ゼロコンプライアンス式微小力測定実験を行った．積分制御の制御周期は 40.96 ms ，ゲインは約 $330 \text{ V}/(\text{s} \cdot \text{m})$ である．約 80 nN の分解能で力を作用点に加え，定常状態 2 分を

平均して作用点と検出点の変位を測定した。測定は複数回行い、その中で比較的線形性の良かったときの力と検出点変位、作用点変位の関係を図 14 に示す。Increase は力を約 80nN ずつ増加させたときの結果で、Decrease は力を減少させたときの結果である。各測定点において約 3000 のデータを取得しており、それらの標準偏差は $0.108\mu\text{m}$ である。実験結果より、作用点に加わった力に対し、作用点変位が一定に保たれており、測定点は線形的に変化し、かつヒステリシスが小さいことがわかる。以上より、本実験装置においても、ゼロコンプライアンス機構が実現できたと言える。なお、ここに掲載されていない測定では、作用点変位は一定に保たれているものの、検出点の変位に関して途中で傾きが変わってしまう場合があった。これは温度や湿度の変化によるものと考えられる。再現性を良くするには、温度や湿度を管理した上で実験をする必要があると考えられる。

Fig. 12 Photo of experimental system.

Fig. 13 Block diagram of Experimental system. The capacitance of the comb electrode is measured by the CDC, which gives the displacement of the movable part. Then, the result is read by a microcomputer and the control voltage is calculated. The output of the microcomputer is inputted to the inverting amplifier circuit. The output voltage of the inverting amplifier circuit is applied to the comb-drive actuator to control the point of force.

Fig. 14 Relationship between the displacement of detection point and point of force, and applied force. While the displacement of the point of force is kept constant, the displacement of detection point changes linearly with respect to the force. It demonstrates the zero-compliance characteristics.

Fig. 15 Comparison of estimated force with applied force. The estimated force is approximately 12% larger than the applied force. The main reason for this error is the estimation error of the spring constant.

つぎに、検出点の変位から推定した力と作用点に加えた力を比較したグラフを図 15 に示す。標準偏差 σ は検出点の変位から換算すると 48.1nN で、 $\pm 3\sigma$ の範囲に測定点がほぼ収まっていると考えると、分解能はこの 6 倍の 289nN となる。これは、これまでに開発された直列二重磁気浮上機構を利用した装置 (水野他, 2014) の分解能 0.1mN と比較すると、約 350 倍に向上している。また、実験結果より、推定値の方が実際の値より、1.1 倍ほど大きくなっていることがわかる。これはばね定数 k_{s2} の同定誤差によるものと考えられるが、較正を行うことによって、このような同定誤差に依存する測定誤差は小さくできると考えられる。実際に $k_{s2} = 0.414$ N/m として計算し直すときの相対誤差を図 16 に示す。測定値には、Increase のときと Decrease のときの平均値を用いている。測定量が小さいときには、誤差を計算するときの分母の値が小さくなり、誤差が大きくなってしまいう傾向があるので、測定量が上述した分解能以下である場合を無視して、誤差の絶対値の平均を計算すると、2.4% となる。これは、較正する前の誤差 19.4% の約 1/8 の大きさとなっている。

Fig.16 Relative error of measurement; the calibrated values are calculated with $k_{s2} = 0.414$ N/m while the original values are done with $k_{s2} = 0.445$ N/m

6. 結 言

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) ゼロコンプライアンス機構を微細化する方法として MEMS 技術を用いることを提案した。
- (2) MEMS 技術でゼロコンプライアンス機構を実現する方法を示した。
- (3) 微細化の有効性を示すため実験装置を製作した。
- (4) 実験装置の作用点に外力を与え、検出点と作用点の変位を計測した。
- (5) 作用点に加わる力に対し、作用点変位が一定に保たれており、測定点は線形的に変化していることを確認した。
- (6) 得られた分解能は 289nN で、従来の装置よりも約 350 倍に向上した。
- (7) (5)・(6)の結果から、MEME 技術で製作した本実験装置においてもゼロコンプライアンス機構を実現できること、及び従来の直列二重磁気浮上機構を利用した力測定装置よりも二桁以上高い分解能が得られることを示した。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業（課題番号：JPMXP09F-20-UT-0130）の支援を受けて、東京大学武田先端知 スーパークリーンルーム微細加工拠点において実施されました。

文 献

- Binnig, G., Quate, C.F. and Gerber, C., Atomic force microscope, Physical Review Letters, Vol.56, No.9 (1986), pp.930-933.
- Boyden, R. P., Britcher, C. P. and Tchong, P., Status of wind tunnel magnetic suspension research, SAE Technical Paper Series 851898 (1985), pp.1-9.
- 江刺正喜, マイクロマシン/MEMS, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 1 (2009), pp.78-79.
- 江刺正喜, はじめての MEMS, 森北出版株式会社 (2011), pp.8-10.
- Jones, F. E. and Schoonover, R. M., Handbook of Mass Measurement (2002), pp.87-93, CRC Press.
- 三田吉郎, MEMS デバイス徹底入門-「つかう」「わかる」「つくる」マイクロマシン・センサー-, 日刊工業新聞社 (2018), pp.149-151.
- 宮崎英樹, 笠谷岳士, 古谷野宏一, 佐藤知正, 微小物体に働く付着力, 日本機械学会 C 編, Vol.64, No.620 (1998),

pp.1250-1257.

- 水野毅, 関根大輔, 高崎正也, 石野裕二, 直列二重磁気浮上を利用した力測定, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0163.
- 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, 多重磁気浮上システム (第1報: 基本構想と基本定理), 日本機械学会論文集 C編, Vol.76, No.761 (2010), pp.76-83.
- 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, ゼロコンプライアンス機構を利用した力測定 (第1報: 測定原理), 第54回自動制御連合講演会講演論文集 (2011), pp.1274-1277.
- Mizuno, T., Hayashi, Y., Takasaki, M., Ishino, Y., Yamaguchi, D., Development of three-degree-of-freedom zero-compliance mechanism for micro force measurement with a cantilever”, Preprints of the 21st World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC World Congress 2020), Paper VII42-01.7 (2020).
- 森田清三, 杉本宜昭, 大藪範昭, Óscar CUSTANCE, 阿部真之, フォースカーブによる元素識別とフォース・マッピング, 表面科学, Vol.29, No.4 (2008), pp.214-220.
- Nahiyani, M.H.A., Mizuno, T., Takasaki, M., Ishino, Y., Hara, M. and Yamaguchi, D., Modeling and validation of vertical direction force estimation with a three-dimensional force measurement instrument based on a zero-compliance mechanism, sensors 2019, Vol. 19, No. 4 (2019), DOI : 10.3390/s19040799.
- 中尾政之, 石井和久, 佐藤知正, 畑村洋太郎, 離脱機構を有する非把持形マイクロ・ハンドリング工具の試み, 日本機械学会 C編, Vol.61, No.583 (1995), pp.1021-1026.
- Sawada, H., Suenaga, H., Suzuki, T. and Ikeda, N., Status of MSBS study at NAL, Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Part 1 (1994), pp.275-289.
- 庄子習一, MEMS・ナノテクノロジーのバイオ・医療分野への応用, 精密工学会誌, Vol.74, No.1 (2008), pp.28-31
- 高林篤, 水野毅, 石野裕二, 高崎正也, ゼロコンプライアンス機構を利用した微小力測定 (第2報: 一体型平行ばね機構を組み合わせた三分力測定装置の開発), 第22回 MAGDA コンファレンス講演論文集 (2013), pp.321-324.

References

- Binnig, G., Quate, C.F. and Gerber, C., Atomic force microscope, Physical Review Letters, Vol.56, No.9 (1986), pp.930-933.
- Boyd, R. P., Britcher, C. P. and Tchong, P., Status of wind tunnel magnetic suspension research, SAE Technical Paper Series 851898 (1985), pp.1-9.
- Esashi, M., Micromachine/MEMS, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 75, No. 1(2009), pp.78-79 (in Japanese).
- Esashi, M., Hajimeteno MEMS, Morikita Publishing Co., Ltd. (2011), pp.8-10 (in Japanese).
- Jones, F. E. and Schoonover, R. M., Handbook of Mass Measurement (2002), pp.87-93, CRC Press.
- Mita, Y., Introduction to MEMS devices, Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd. (2018), pp.149-151 (in Japanese).
- Miyazaki, H., Kasaya, T., Koyano, K. and Sato, T., Adhesive force acting on micro objects, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.620 (1998), pp.1250-1257 (in Japanese).
- Mizuno, T., Sekine, D., Ishino, Y. and Takasaki, M., Force measurement using double series magnetic suspension, Transactions of the JSME (in Japanese), Series C, Vol.80, No.814 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0163.
- Mizuno, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Multiple magnetic suspension systems (1st report: basic concepts and theorems), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.76, No.761 (2010), pp.76-83 (in Japanese).
- Mizuno, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Force measurement with zero-compliance mechanism (1st report: principle of measurement), Proceedings of the 54th Japan Joint Automatic Control Conference (2011), pp.1274-1277 (in Japanese).
- Mizuno, T., Hayashi, Y., Takasaki, M., Ishino, Y., Yamaguchi, D., Development of three-degree-of-freedom zero-compliance mechanism for micro force measurement with a cantilever”, Preprints of the 21st World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC World Congress 2020), Paper VII42-01.7 (2020).
- Morita, S., Sugimoto, Y., Oyabu, N., Custance, O. and Abe, M., Chemical identification by force curves, and force mapping, Journal of The Surface Science Society of Japan, Vol.29, No.4 (2008), pp.214-220.
- Nahiyani, M.H.A., Mizuno, T., Takasaki, M., Ishino, Y., Hara, M. and Yamaguchi, D., Modeling and validation of vertical direction force estimation with a three-dimensional force measurement instrument based on a zero-compliance mechanism, sensors 2019, Vol. 19, No. 4 (2019), DOI : 10.3390/s19040799.

- Nakao, M., Ishii, K., Sato, T. and Hatamura, Y., Prototypes of micro nontweezing handling tools with releasing mechanism, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.61, No.583 (1995), pp.1021-1026 (in Japanese).
- Sawada, H., Suenaga, H., Suzuki, T. and Ikeda, N., Status of MSBS study at NAL, Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Part 1 (1994), pp.275–289.
- Shoji, S., MEMS and nanotechnologies for medical and bioapplications, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 74, No. 1 (2008), pp.28-31
- Takabayashi, A., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Microforce measurement using a zero-compliance mechanism (2nd report : development of three-DOF force transducer using a parallel spring device), Proceedings of MAGDA conference (MAGDA 2014) (2014), pp.321-324.