三次元プローブ用高精度シリコン平行ばねセンサ*

林 正 和**

内 田 順 三**

A High Precision Silicon-Based Parallel-Spring Sensor for Analog Probes of Coordinate Measuring Machines

Masakazu HAYASHI and Junzo UCHIDA

A one-dimensional sensor is developed for the purpose of an analog probe with nanometer order resolution for coordinate measuring machines. The manufactured sensor has parallel-spring structure, to which a single-crystal silicon of 3mm cube is broached and on which the piezoresistances are processed. The piezoresistance can be constructed in a Wheatstone-bridge, and a signal output can be obtained. The result of characteristics evaluation of a single parallel-spring sensor shows that the elastic compliance is 3 micrometer/N, the measuring resolution is 15nm and the eigenfrequency is 29kHz. These values are well in agreement with the theoretical values. From theoretical consideration, it is estimated that the measurement ranges are 180 micrometers and the minimum eigenfrequency is about 10kHz in a 3-dimensional probe.

Key words: sensor, parallel-spring, coordinate measuring machine, analog probe, crystal silicon, piezoresistance

1. 緒 言

近年、CD-ROMやDVD(Digital Video Disk)用の光ピックアップをはじめとして、さまざまな部品の微小化が急速に進んでいる。このような状況にともない、微小光学部品やその成型金型の三次元形状を、数10nm程度の精度で測定できる計測技術が望まれている¹⁾。このような精密部品では、数10nm程度の範囲で複雑な形状の把握が必要なため、現状より精密な三次元測定機が望まれ、ナノCMM(Coordinate Measuring Machine)の提案がなされている²⁾。

このような測定機においては、その性能を決定する重要な要素の一つにプローブ性能がある。一般的に、三次元プローブにはタッチトリガ方式とスキヤニング方式がある。

タッチトリガ方式としては、プローブ球を細いパイプの先端に保持して衝撃時の空気の流れ変化を利用する方式³⁾⁴⁾やプローブのスタイラス部に圧電素子を組み込んで衝撃信号を利用する方式⁵⁾などが開発されている。

また、スキヤニング方式としては、弾性ヒンジ型として、スタイラスを弾性体の3本腕で支え、その変位測定に光や静電容量型センサを利用する方式⁶⁾⁷⁾や、同様の形態でマイクロマシン技術を適用して、変形測定にシリコンのピエゾ抵抗を利用する方式⁸⁾が開発されている。

これら弾性ヒンジ型プローブは、ナノメートルオーダの変位分解能と低測定圧を実現しているが、3本の弾性体を同一平面内に配置しているため、面内方向(XY方向)の測定変位の解析は、かなり複雑であると思われる。

そこでわれわれは従来型の三次元測定機と同様、直交三軸を持つスキヤニングプローブであるが、サイズを極めて小さくしたプローブを考案した。それは小型化によって、測定変位の検出感度と動特性を改善できる可能性があるからである。

ここでは小型化の例として、3mm立方の一次元平行ばねセンサ⁹⁾を試作し、その基本特性を明らかにした。また、このセン

サを三次元プローブに応用した場合については、特性の考察を行ったので報告する。

2. 構 成 概 念

考案した三次元プローブの構想図を図1に示す。図の(a)は三次元プローブの概念図で、機械的特性が極めて均一な単結晶シリコンを平行ばね形状に加工し、このユニットをXYZ方向に3段重ねる構造である。さらにこの平行ばねユニットのヒンジ部には、半導体製造プロセスでピエゾ抵抗を製作し、これを利用してプローブに印加された変位・荷重を測定する方式である。図の(b)は平行ばねセンサの模式図で、外力が加わった場合の変形と、これにともなって発生するピエゾ抵抗Rの変化を示している。ピエゾ抵抗は平行ばねの表裏のヒンジ部すべてに製作するので、図のAとBおよびCとDでは、引張と圧縮のひずみが相等しく発生し、符号の異なる抵抗変化が得られる。

さらにピエゾ抵抗の変化を取り出す信号処理回路は図の(c)のように、ヒンジ部4箇所の抵抗を用いてホイートストーンブリッジ回路を構成する方式である。

3. 製造プロセス

上述のような三次元プローブを構成するための平行ばねセンサを試作した。この平行ばねセンサの製造プロセスを図2に示す。図のように母材は厚さ3mmで直径3インチのn型シリコンウェハを用いた。一般にシリコンウェハの厚さは0.6mmに統一されているが、センサを立方体に製作するために、特に3mm厚のウェハを製作した。

まず、シリコンの表面に熱酸化膜を形成し、ヒンジになる部分にパターニングを行う。パターニングはウェハの表裏に行うが、表裏の位置ずれが生じないように、パターン間のアライメントを行った。次に、このパターン部分にボロニオンを拡散注入し、P型抵抗層を形成する。ピエゾ抵抗を製作する面は、結晶の(110)面で、抵抗の長軸方向は方位<111>に選定する。この時のボロンの拡散深さは約2μm、表面濃度は約10²⁰atm/cm³、np層の界面の濃度は約10¹⁵~10¹⁶atm/cm³である。

さらに電極形成のためのマス킹、蒸着、エッチングによ

* 原稿受付 平成14年8月8日

** 正会員 (株)東芝 (現、芝浦メカトロニクス(株)); 横浜市
栄区笠間 2-5-1)

*** 正会員 (株)東芝 (東京都港区芝浦 1-1-1)

るアルミ膜のパターニングを行う。その後 450°C で 30 分間加熱して、シリコンとアルミとのオーミックな接合を図る(シンタリング)。この工程で製作したピエゾ抵抗の抵抗値は約 1k Ω で、3 インチ当たり 350 ユニット分のパターンを製作した。

半導体プロセスで製作したパターン付きウェハを、3mm 幅に切断し、超音波加工により平行ばねのヒンジ部の加工を行う。さらに、これを一辺 3mm の立方体に加工し、洗浄・フロン乾燥を行って、平行ばねセンサを製作した。製作したユニットは、マコール製の台座をセンサに接着し、これを介してスタイラス(レニショー製)を取り付けた。

製作した平行ばねセンサの概観を図 3 に示す。図の左側が平行ばねセンサ単体で、右側がセンサにスタイラスを取り付けた一次元プローブである。

4. 特性の解析

プローブを構成する平行ばねの機械特性の解析を行った。

4.1 変位特性の解析

まず図 4(a)のように、両側を切り欠いた単一ヒンジ部に曲げモーメント M が作用して、ヒンジが角度 θ たわむモデルを考える。切欠き部の形状が円弧であり、かつこの部分の半径が

ヒンジ肉厚より十分大きい場合には、はりの理論を適用して曲げコンプライアンスが求められている¹⁰⁾。次に、図(b)のように片側を切り欠いたヒンジを考えると、ヒンジ断面の断面二次モーメントは、(a)の 1/8 倍になる。このことを適用すると、(b)の曲げコンプライアンス C_b は、下式のように導くことができる。

(a) Hinge model of both sides cut (b) Hinge model of one side cut

(c) Parallel-spring block

Fig.4 Model of the sensor unit

$$C_b = \frac{\theta}{M} = \frac{24r}{Ek} \left(\frac{1}{4r^2t} + \frac{3}{8rt^2} + \frac{3\pi}{8\sqrt{2}} \frac{1}{r^{0.5}t^{2.5}} \right) \quad (1)$$

ここで、 E はヤング率、 k は平行ばねの厚さ、 r は切欠き円の半径、 t は切欠き部の最小厚さである。さらに式(1)の主成分はカッコ内の第3項であり、よって式(1)は、

$$C_b \approx \frac{9\pi}{\sqrt{2}} \frac{r^{0.5}}{Ekt^{2.5}} \quad (2)$$

と近似できる。

さらに図4(c)のように、平行ばね可動部に外力 F が働いて、変位 d が発生した場合は、 M と θ は上下ヒンジ間の間隔 h_2 を用いて、

$$M = h_2 F / 2 \quad (3)$$

$$\theta = d / h_2 \quad (4)$$

と表せ、

$$\frac{d}{F} = \frac{h_2^2}{2M} \theta \quad (5)$$

を得る。したがって、平行ばね全体の弾性コンプライアンス C_s は、式(5)に式(2)を適用して、

$$C_s = \frac{d}{F} = \frac{9\pi}{2\sqrt{2}} \frac{h_2^2 r^{0.5}}{Ekt^{2.5}} \quad (6)$$

となる。

さらに平行ばねが変位したとき、ばねに生じる最大応力 σ_m はヒンジ部の中央表面に発生する。よって、 σ_m はヒンジ中央の断面二次モーメント I を用いると、

$$\sigma_m = \frac{M}{I} \frac{t}{2} = \frac{6M}{kt^2} \quad (7)$$

となる。ここで、式(7)に式(3)と式(6)を適用すると、

$$\sigma_m = \frac{2\sqrt{2}Edt^{0.5}}{3\pi h_2 r^{0.5}} \quad (8)$$

を得ることができる。

4.2 固有振動数の解析

次に平行ばねの下部を固定し、上部を運動させる場合の固有振動数を算出する。

まず、図4のように平行ばね上部質量を m_1 、平行ばね側部の質量を m_2 、側部慣性モーメントを J とすると、平行ばねの運動エネルギー T は、

$$T = 2 \left(\frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \right) + 2 \left(\frac{1}{2} m_2 \left(\frac{h_2}{2} \dot{\theta} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} m_1 (h_1 \dot{\theta})^2 = P \dot{\theta}^2 \quad (9)$$

となる¹¹⁾。ここで $\dot{\theta}$ はたわみ角の角速度で、係数 P は、

$$P = J + \frac{1}{4} h_2^2 m_2 + \frac{1}{2} h_1^2 m_1 = \left(\frac{h_3^2}{12} + \frac{w_1^2}{12} + \frac{h_2^2}{4} \right) h_3 w_1 k \rho + \frac{1}{4} h_2^2 h_3 w_1 k \rho + \frac{1}{2} h_1^2 h_4 w k \rho \quad (10)$$

と近似する。ここで、 h_i ($i=1 \sim 4$) と w 、 w_1 は、図4(c)に示した寸法であり、 ρ はシリコン単結晶の密度である。

また、平行ばね上部が運動する場合のポテンシャルエネルギー U は、

$$U = 4 \left(\frac{1}{2C_b} \theta^2 \right) \quad (11)$$

である。ここで C_b は先に示したはりの曲げコンプライアンスである。

式(9)と式(11)にラグランジュの運動方程式を適用すると、

$$P \ddot{\theta} + \frac{2}{C_b} \theta = 0 \quad (12)$$

を得て、これより固有振動数 f_0 は、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{PC_b}} \quad (13)$$

となる。

5. 特性評価実験

5.1 ピエゾ抵抗の変化率測定

圧電アクチュエータで平行ばねセンサを変位させたときの、ピエゾ抵抗値の変化を測定した。

結果を図5に示す。横軸は圧電アクチュエータで駆動し、後に電気マイクロメータで校正し読みかえた変位置、縦軸はピエゾ抵抗の変化率である。抵抗値はテストで測定した。

図から A・D のピエゾ抵抗は変位に対して線形に増加し、B・C のピエゾ抵抗は逆に減少していることが分かる。これは、A・D 位置のヒンジには引張りずみが生じ、逆に B・C 位置のヒンジには圧縮ひずみが生じていることに対応している。

Fig.5 Piezoresistance characteristics by modification

ここで、C・Dのピエゾ抵抗値とその変化率が、A・Bのそれに対してやや大きいのは、半導体製作プロセスによる抵抗値のばらつきによる効果と、ヒンジ部の厚みの差による効果と考えられる。この実験から、抵抗の変化率は $15\mu\text{m}$ の変位に対して $0.60\sim 0.92\%$ であった。したがって、抵抗値の偏りについては外部抵抗が、また抵抗変化率の偏りについてはブリッジ出力増幅器の補償回路が必要であることが分かる。

5.2 静特性の測定

図6に静特性測定のための実験装置を示す。平行ばねセンサは定盤に固定し、手動の位置決めステージを用いてセンサ上部を変位させた。変位量は、てこ式電気マイクロメータ（テサ製、測定荷重 0.1N 、精度 15nm ）で測定した。また、ステージと平行ばねの間に、ロードセル（共和電業製、LM-500GA、最大荷重 5N ）をはさんで荷重を同時測定した。電気マイクロメータとロードセルの出力信号および平行ばねセンサのブリッジ出力信号は、図のようにアナログスキャナ付きDMM(Keithley 製、Model2000-Tcscan)を介してコンピュータに取り込んだ。

実験の結果を図7に示す。位置決めステージを用いて、約 $3\mu\text{m}$ の変位を3回繰り返し加えた結果である。図の横軸は電気マイクロメータによる変位量 d 、縦軸はブリッジ出力信号 e_o と荷重 F である。図からデータは比較的良く直線にのっていることが分かる。ここで電気マイクロメータの測定圧が、測定変位内で一定であることは、平行ばねセンサを取り除いた実験で確認した。そこで図の荷重は、測定圧をオフセットとして差引いた値で示した。

図7のデータ群にあてはめた近似直線の傾きから、平行ばねセンサの出力感度は $9.86\text{mV}/\mu\text{m}$ 、弾性定数は $0.332\text{N}/\mu\text{m}$ （コンプライアンス C_s （実験値）で $3.01\mu\text{m}/\text{N}$ ）となった。

Fig.6 Experimental apparatus for measuring characteristics

5.3 ドリフトの測定

図6の実験装置において、ロードセルの荷重を約 0.2N に設定して、4時間放置した場合のセンサ出力を測定した。

測定結果から偏差量を計算したデータを図8に示す。図で横軸が時間、左縦軸が10倍の偏差温度 $\Delta\theta$ とセンサ出力 Δe_o 、右縦軸が偏差荷重 ΔF である。

図から室温が4時間で 0.4°C 増加し、これと同時に荷重が約 10mN 増加している。この荷重増加はロードセルの位置決めステージのドリフトによって生じた現象であり、したがって静特性実験で求めた係数を用いて、荷重相当分のセンサ出力を補正した。この補正結果も図6に重ね合わせて示した。

この結果から、 0.4°C の温度変化に対する補正後のセンサの出力変化は 0.84mVp-p であった。ここで、先のセンサの出力感度 $9.86\text{mV}/\mu\text{m}$ を考慮すると、変位のドリフトは $0.21\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ に相当する。したがって、例えば 15nm のドリフトを得ようと

Fig.7 Static characteristics of the sensor

Fig.8 Thermal drift of the sensor output

する場合には、 0.07°C 以下の環境が必要である。

5.4 分解能の測定

次に、センサの分解能の測定実験を行った。図6の実験装置において、ロードセルの代わりに、積層型圧電アクチュエータを設定し、アクチュエータを 0.5Hz の正弦波電圧で駆動して、平行ばねセンサの出力を観察する実験を行った。図6のブロック図のように、ブリッジ出力 e_b を約 250 倍に増幅し、 1kHz のローパスフィルタを通して、電気マイクロメータ出力と同時にオシロスコープで観察した。

実験結果を図9に示す。図の上側波形 e_m が電気マイクロメータ出力で、下側波形 e_a が増幅・フィルタリング後のセンサ出力である。

波形 e_m から正弦波駆動の振幅は 60nm (20mV) であり、このときセンサからは、振幅 $146\text{mV}_{\text{p-p}}$ の信号が得られている。また、このセンサ出力信号のノイズは 36mV で、このデータからセンサの変位測定分解能は 15nm ($=60\text{nm}/(36/146)$) であるといえる。また、この変位分解能をセンサの弾性コンプライアンス C_s ($=3.01\mu\text{m}/\text{N}$) で換算すると、力の分解能は 5.0mN になる。

5.5 固有振動数の測定

図10は、平行ばねセンサの固有振動数の測定装置と結果である。図10(a)は実験装置で、平行ばねセンサの固定側に圧電アクチュエータを取り付け、周波数掃引した正弦波電圧を加え平行ばねを振動させた。また、平行ばねセンサの可動部には、

Fig.9 Outputs of the electro-micrometer and the sensor

光ファイバ式変位センサ (EWIG 製, Model18500) を配置して、変位信号をFFTアナライザ (HP 製, 3563A) に取り込んで解析した。図10(b)はFFTアナライザの解析結果で、 5kHz から 50kHz の周波数特性である。

ゲイン (入出力信号の比) のピーク周波数は 29.1kHz であり、これが平行ばねセンサの固有振動数 f_0 (実験値) である。

5.6 一次元プローブによる測定実験

ブロックゲージ (呼び値 $5\times 9\times 35\text{mm}$) を2個リングングし、段差を持つサンプルを作製した。このサンプルを図3の平行ばねセンサで構成した一次元プローブを用いて測定した。

図11(a)はこの一次元プローブを用いた実験結果である。サンプル (ブロックゲージ) をエアースライドテーブル上に搭載して、表面を走査した。図から 20nm 程度のノイズが観察されるが、段差測定値は 98nm である。

また、図11(b)は、同じサンプルを表面粗さ計 (テラホブソン製, Talysurf6) で測定した結果である。グラフから段差測定値は 105nm である。

一次元プローブの実験に使用したエアースライドは、脈動が 20nm 程度ある。このことを考慮すると、両者の測定結果は良く一致しているといえる。

6. 考 察

6.1 平行ばねセンサの特性について

表1に試作した平行ばねセンサの設計値を示した。この設計値を用いて、式(6)からセンサの弾性コンプライアンス C_s (計算値) を求めると、 $3.13\mu\text{m}/\text{N}$ となる。一方、図7の実験結果から得られたコンプライアンス C_s (実験値) は $3.01\mu\text{m}/\text{N}$ であり、計算値との差は約4%であった。

また同様に表1から、式(10)の係数 P は $2.39\times 10^{-11}\text{kgm}^2$ 、式(2)の曲げコンプライアンス C_b は $2.51\text{rad}/\text{N}\cdot\text{m}$ で、式(13)から、固有振動数 f_0 (計算値) は 29.1kHz となる。一方、図10の実験から f_0 (実験値) も 29.1kHz であり、計算値と良

(a) Experimental apparatus

(b) Result of the signal analyzer

Fig.10 Dynamic characteristics of the sensor

(a) Result of the sensor with a stylus

(b) Result of the surface roughness tester

Fig.11 Experimental results of measuring an artificial step

く一致した。

さらにこのセンサの最大変位量は、ヒンジ部に発生する応力が降伏応力に達する場合であると考えられる。そこで表1の降伏応力 σ_{my} ¹²⁾¹³⁾ の一例として、2GPa を式(8)に代入し、限界変位量 d_m を求めると $89\mu\text{m}$ を得る。この値がこのセンサの測定レンジに相当する。

6.2 三次元プローブの特性について

まず、三次元プローブの静特性について考察する。図1の三次元プローブを想定すると、前節の考察からXY方向のそれぞれについて、測定レンジは $\pm 89\mu\text{m}$ 、分解能 15nm が得られると考えられる。

一方Z方向については、X軸とY軸の平行ばねセンサの自重による初期変位が発生する。単一平行ばねの計算質量 m_i が 29mg であり、コンプライアンス C_s が $3\mu\text{m/N}$ であることを考慮すると、自重による初期変位は約 2nm である。したがって、Z軸についてもXY方向と同等の測定レンジと分解能が得られると考えられる。

また、図4(c)のモデルに示したように、平行ばねの可動部は変位によって、高さ方向に沈む特性すなわち軸間の干渉を持つ。図1(a)の三次元プローブを想定すると、XY変位からはZ軸に、Z変位からはY軸にこの干渉を持つことになる。これらの干渉量については、可動軸変位からの補償が可能である。またこのほかに、平行ばね可動部の真直度や、軸のアライメントも干渉の原因となる。これら総合的な干渉については試作による検証が必要である。

次に、プローブの動特性について考察する。三次元プローブでは、測定時の応答性は、機械的な固有振動数の制限を受けると考えられる。前節の結果から、単一の平行ばねセンサの固有振動数 f_0 は、 29kHz であった。図1の三次元プローブを想定すると、プローブ先端のスタイラスの質量が無視できる場合には、この値は f_x に相当する。

一方、YZ軸については、注目しているセンサより先端のセンサユニットが負荷になるので、固有振動数は低下する。単一平行ばねの質量 m_i を用いると、Y軸の固有振動数 f_y は式(9)の質量 m_1 を (m_1+m_i) に置き換えた式になり、Z軸の固有振動数 f_z は、 m_1 を (m_1+2m_i) に置き換えた式になる。質量 m_i の計算値 29mg を用いて計算すると、 f_y は 15kHz 、 f_z は 12kHz と

Table 1 Design conditions of sensor mechanism

Parameters	Symbol	Unit	Value
Young's modulus	E	N/m^2	1.67×10^{11}
Density	ρ	kg/m^3	2.30×10^3
Yield stress	σ_{my}	N/m^2	$2 \sim 7 \times 10^9$
Block height	h	mm	3.00
Moved part distance	h_1	mm	2.08
Hinge distance	h_2	mm	1.58
Side part height	h_3	mm	0.98
Moved part height	h_4	mm	0.41
Block width	w	mm	3.00
Side part width	w_1	mm	0.60
Block depth	k	mm	3.00
Hinge radius	r	mm	0.30
Hinge thickness	t	mm	0.15

なった。

これらの値から、プローブの機械的特性から受ける応答周波数の制限は約 10kHz であるといえる。

6.3 平行ばねセンサのサイズ効果の検討

ここでは、平行ばねセンサの変位感度と動特性における小型化の効果を検討する。試作した 3mm 立方のセンサの各寸法を相似的に拡大・縮小した場合(拡大率 κ)で、特にピエゾ抵抗部の検出ひずみがヒンジ部のひずみを充分検出できる場合を考える。

まず、変位の分解能 d_r について検討する。ヒンジ表面のピエゾ抵抗に生じたひずみを ε とすると、ヒンジ表面応力 σ_m は、 $\sigma_m = E\varepsilon$ である。ここで式(8)を用いると、

$$\sigma_m = \frac{2\sqrt{2}Edt^{0.5}}{3\pi h_2 r^{0.5}} = E\varepsilon$$

であるから、

$$d_r = \frac{3\pi h_2 r^{0.5}}{2\sqrt{2}t^{0.5}} \varepsilon = d_{r0} \kappa \quad (14)$$

となる。ここで d_{r0} はセンサが 3mm 立方の場合の変位分解能である。

すなわちひずみ ε が同一であれば同じセンサ出力が得られるため、式(14)は相似形のセンサの変位分解能 d_r が拡大率 κ に比例することを示している。

次に、検出できる力の分解能 F_r は式(6)を変形し、式(14)を適用すると、

$$F_r = \frac{2\sqrt{2}Ekt^{2.5}}{9\pi h_2^2 r^{0.5}} d_r = \frac{2\sqrt{2}Ekt^{2.5}}{9\pi h_2^2 r^{0.5}} d_{r0} \kappa$$

であるから、

$$F_r = F_{r0} \kappa^2 \quad (15)$$

となる。ここで力の分解能 F_{r0} は、 3mm 立方センサの値であり、式(15)は F_r が κ^2 に比例することを示している。

同様に測定レンジ d_m は、式(8)に降伏応力 σ_{my} を適用した場合であるから、

$$d_m = \left(\frac{3\pi h_2 r^{0.5}}{2\sqrt{2}Et^{0.5}} \right) \sigma_{my} = d_{m0} \kappa \quad (16)$$

となる。 d_{m0} は 3mm センサの測定レンジであり、式(16)は、測定レンジ d_m も κ に比例することを示している。

測定帯域を決める固有振動数は、式(13)より、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{PC_b}}$$

である。ここで係数 P は式(10)より κ の5乗に比例し、曲げコンプライアンス C_b は式(2)より κ の3乗に反比例する。よって、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{PC_b}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{P_0 C_{b0} \kappa^2}} = f_{00} \kappa^{-1} \quad (17)$$

を得る。この式(17)は固有振動数が κ に反比例することを示している。ここで、係数 P_0, C_{b0} および固有振動数 f_{00} は先の例と同様に 3mm センサの固有値である。

図12は、式(14)～(17)の解析結果を、センサの一边の長さ w, h, k もしくは拡大率 κ を横軸にとり、グラフ化した結果である。一边の長さは、0.1mm から 100mm (κ で 0.0316 から 31.6) とした。図の左縦軸が変位分解能・測定レンジ・力の分解能で、右縦軸が固有振動数である。パラメータはすべて単一平行ばねセンサに関する値で、図の線分 S 上の点が、試作センサの実験値である。図からセンサの寸法が小さくなると、測定レンジは減少するが、動特性を決定する固有振動数と同時に、変位と力の分解能が向上することが分かる。

今回は平行ばねセンサを試作する際、超音波加工によるヒンジ形状のばらつきを考慮して、センササイズを 3mm、ヒンジ厚を 0.15mm とした。しかし、加工法の改良によるセンサのさらなる縮小化や解析解に基づくヒンジ形状の改良、およびピエゾ抵抗の占有面積の縮小化によって、本構成の平行ばねセンサと三次元プローブは、さらなる特性の改善ができると考えられる。

7. 結 言

本研究では、三次元測定に適用できる弾性ヒンジ型プローブの開発を目指して、平行ばねセンサを試作した。試作したセンサは、3mm 立方の単結晶シリコンで、ヒンジ部に製作したピエゾ抵抗でホイートストンブリッジ出力を得る方式である。

試作した平行ばねセンサについて、解析と特性評価実験を行った結果以下の結論を得た。

- (1) 静特性の評価実験から、平行ばねセンサのコンプライアンスは $3.01 \mu\text{m}/\text{N}$ であり、計算値との差は約 4% であった。
- (2) 動特性の評価実験から、単一センサの固有振動数は 29.1kHz であり、この値は計算値と良く一致した。
- (3) 実験から、センサの変位分解能は 15nm であり、変位のドリフトは、 $0.21 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ であった。したがって、分解能に相当する変位の安定度を得ようとする場合は、約 0.07°C の恒温環境が必要である。
- (4) 三次元プローブを想定して、降伏応力から推定した測定レンジは、約 $180 \mu\text{m} (\pm 90 \mu\text{m})$ で、質量から推定した最小固有振動数は約 10kHz であった。
- (5) 解析結果の考察から、センサの縮小化は動特性（固有振動数）と同時に、変位・力の分解能の向上に有効であることが分かった。

Fig.12 Size-effect estimation of sensor characteristics

この平行ばねセンサは小型・軽量であり、高分解能と高い周波数帯域を実現できた。またピエゾ抵抗の補償や軸間の干渉の補償によって、この平行ばねセンサは次世代の精密三次元測定機への展開が可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 高谷裕浩：マイクロ部品のナノ3次元形状計測，精密工学会誌，68，3（2002）357。
- 2) 小澤聡，高増潔，大園成夫，古谷涼秋，上野滋：nano-CMMの開発（第1報）—基本構成—，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（1995）1043。
- 3) 高増潔，郭志徹，鈴木昭洋，平木雅彦，古谷涼秋，大園成夫：吸気型ボールプローブの開発（第1報）—基本的構成—，精密工学会誌，64，8（1998）1153。
- 4) 郭志徹，高増潔，平木雅彦，古谷涼秋，大園成夫：吸気型ボールプローブの開発（第2報）—空気トリガセンサ式プローブの評価実験—，精密工学会誌，66，4（2000）612。
- 5) 石川修弘，日高和彦，西村国俊：三次元測定機用タッチ信号プローブのセンサ機構の開発，精密工学会誌，66，2（2000）304。
- 6) H.Haitjema, W.O.Pril and P.H.J.Schellekens : A Silicon-Etched Probe for 3-D Coordinate Measurements With an Uncertainty Below $0.1 \mu\text{m}$, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 50, 6 (2001) 1519.
- 7) G.N.Peggs, A.J.Lewis and S.Oldfield : Design for a Compact High-Accuracy CMM, Annals of the CIRP, 48, 1 (1999) 417.
- 8) H.Haitjema, W.O.Pril and P.H.J.Schellekens : Development of a Silicon-Based Nanoprobe System for 3-D Measurements, Annals of the CIRP, 50, 1 (2001) 365.
- 9) 内田順三，林正和：シリコン平行ばね型マイクロ変位センサの開発（第一報）—センサの特性解析—，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1991）285。
- 10) 田中充，中山貴：一体型微動機構に用いられる円弧切り欠き支点のまげ弾性，応用物理，50，3（1981）212。
- 11) 津田展宏，山田啓文，石田文彦，宮下正之，山口正高：大ストロークSTM，精密工学会誌，55，1（1989）146。
- 12) K.E.Petersen : Silicon Torsional Scanning Mirror, IBM Journal of Research and Development, 24, 5 (1980) 631.
- 13) N.C.MacDonald, L.Y.Chen, J.J.Yao, Z.L.Zhang, J.A.McMillan, D.C.Thomas and K.R.Haselton : Selective Chemical Vapor Deposition of Tungsten for Microelectromechanical Structures, Sensors and Actuators, 20, 1 (1989) 123.