

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5148219号
(P5148219)

(45) 発行日 平成25年2月20日(2013.2.20)

(24) 登録日 平成24年12月7日(2012.12.7)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 L 5/16 (2006.01) G O 1 L 5/16

請求項の数 4 (全 24 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2007-237654 (P2007-237654) (22) 出願日 平成19年9月13日 (2007.9.13) (65) 公開番号 特開2009-68988 (P2009-68988A) (43) 公開日 平成21年4月2日 (2009.4.2) 審査請求日 平成22年4月22日 (2010.4.22)</p> <p>(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願 (平成19年度独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構「(ナノテクノロジープログラム) / 「ナノテク・先端部材実用化研究開発」 / 「ナノ薄膜技術を用いたロボットのための集積多軸触覚センサの開発」、産業技術力強化法第19条の適用を受けるもの)</p>	<p>(73) 特許権者 393031586 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 (73) 特許権者 000111085 ニッタ株式会社 大阪府大阪市浪速区桜川4丁目4番26号 (74) 代理人 100098305 弁理士 福島 祥人 (72) 発明者 吉田 俊介 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内 (72) 発明者 野間 春生 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
--	--

(54) 【発明の名称】 触覚センサユニットおよびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

印加された圧力ならびに互いに異なる方向の第1および第2の剪断力に対応する出力値を与える触覚センサと、

前記触覚センサに印加される圧力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数またはその第1の関数の第1の係数群、前記触覚センサに印加される第1の剪断力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数またはその第2の関数の第2の係数群、および前記触覚センサに印加される第2の剪断力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数またはその第3の関数の第3の係数群を予め記憶する記憶手段と、

使用時に、前記記憶手段に記憶された前記第1、第2および第3の関数または前記第1、第2および第3の係数群に基づいて、前記第1、第2および第3の関数を用いて前記触覚センサの出力値を圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換する出力変換手段とを備え、

前記触覚センサは、

基板と、

前記基板上に異なる向きに設けられ、半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子と、

前記少なくとも3つのセンサ素子を被覆する弾性を有する被覆層と、

前記少なくとも3つのセンサ素子の前記カンチレバーのピエゾ抵抗の変化により変化する信号をそれぞれ出力する出力回路とを含み、

前記触覚センサの出力値は、前記少なくとも3つのセンサ素子に対応して前記出力回路から出力される少なくとも3つの信号を含み、

前記第1の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第1の係数および他の第1の係数を含み、前記第1の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第1の係数との積和に前記他の第1の係数を加算する演算式の二乗であり、

前記第2の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第2の係数および他の第2の係数を含み、前記第2の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第2の係数との積和に前記他の第2の係数を加算する演算式の二乗であり、

前記第3の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第3の係数および他の第3の係数を含み、前記第3の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第3の係数との積和に前記他の第3の係数を加算する演算式の二乗であることを特徴とする触覚センサユニット。

【請求項2】

前記センサ素子の各々は、前記基板上に第1の膜からなる支持部および第2の膜からなる可動部をこの順に備え、前記第2の膜は半導体材料からなり、第1の格子定数を有する第1の層と、第1の格子定数よりも小さな第2の格子定数を有する第2の層とを順に含み、前記第1および第2の層の少なくとも一方は、不純物元素の添加により一導電性を有し、前記第1の格子定数と前記第2の格子定数との差に起因して前記可動部が湾曲するとともに、前記可動部の一部が前記支持部を介して前記基板に固定され、前記可動部が前記カンチレバーであることを特徴とする請求項1記載の触覚センサユニット。

【請求項3】

前記触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と前記触覚センサの出力値とに基づいて前記第1、第2および第3の係数群を算出する算出手段をさらに備えたことを特徴とする請求項1または2記載の触覚センサユニット。

【請求項4】

印加された圧力ならびに互いに異なる方向の第1および第2の剪断力に対応する出力値を与える触覚センサと、前記触覚センサに印加される圧力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数またはその第1の関数の第1の係数群、前記触覚センサに印加される第1の剪断力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数またはその第2の関数の第2の係数群、および前記触覚センサに印加される第2の剪断力と前記触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数またはその第3の関数の第3の係数群を予め記憶するための記憶手段と、前記記憶手段に記憶された前記第1、第2および第3の関数または前記第1、第2および第3の係数群に基づいて、前記第1、第2および第3の関数を用いて前記触覚センサの出力値を圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換する出力変換手段とを製作する工程と、

前記触覚センサに圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を印加するとともに前記触覚センサの出力値を取得する工程と、

前記印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と前記取得される出力値とに基づいて前記第1、第2および第3の係数群を算出する工程と、

前記算出された前記第1、第2および第3の係数群をそれぞれ含む第1、第2および第3の関数、または前記第1、第2および第3の係数群を前記記憶手段に記憶させる工程とを備え、

前記触覚センサは、

基板と、

前記基板上に異なる向きに設けられ、半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子と、

前記少なくとも3つのセンサ素子を被覆する弾性を有する被覆層と、

前記少なくとも3つのセンサ素子の前記カンチレバーのピエゾ抵抗の変化により変化する

10

20

30

40

50

る信号をそれぞれ出力する出力回路とを含み、

前記触覚センサの出力値は、前記少なくとも3つのセンサ素子に対応して前記出力回路から出力される少なくとも3つの信号を含み、

前記第1の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第1の係数および他の第1の係数を含み、前記第1の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第1の係数との積和に前記他の第1の係数を加算する演算式の二乗であり、

前記第2の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第2の係数および他の第2の係数を含み、前記第2の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第2の係数との積和に前記他の第2の係数を加算する演算式の二乗であり、

前記第3の係数群は、前記少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第3の係数および他の第3の係数を含み、前記第3の関数は、前記少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第3の係数との積和に前記他の第3の係数を加算する演算式の二乗であることを特徴とする触覚センサユニットの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、触覚センサユニットおよびその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

マルチモーダルなインタラクション環境を実現するために、コンピュータからユーザに情報を提示する機能とともに、コンピュータが外界の状況を知覚する機能の研究開発が行われている。人の皮膚のように接触面の圧力および剪断力を同時に検出することが可能な触覚センサは、遠隔地の物理的な接触状況を把握するため、およびロボットが確実に物を操作しかつ安全に人と接するために必要である。

【0003】

このような機能を実現する触覚センサとして、ナノ薄膜生成技術により作製される微小な4本のカンチレバー（片持ち梁）を用いて圧力および剪断力を同時に検出可能な多軸触覚センサの開発が進められている（非特許文献1参照）。

【非特許文献1】「ナノ薄膜生成技術を応用した集積多軸触覚センサによる形状認識手法の検討」 日本VR学会第11回大会，pp.261-262,2006

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、上記の多軸触覚センサは微小なカンチレバーからなるため、製造条件のばらつきにより印加された圧力および剪断力と出力値との関係を一定にすることが困難である。そのため、圧力および剪断力を同時にかつ高精度に検出することが可能な触覚センサは実現されていなかった。

【0005】

本発明の目的は、圧力および剪断力を同時にかつ高精度に検出することが可能な触覚センサユニットおよびその製造方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

(1) 第1の発明に係る触覚センサユニットは、印加された圧力ならびに互いに異なる方向の第1および第2の剪断力に対応する出力値を与える触覚センサと、触覚センサに印加される圧力と触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数またはその第1の関数の第1の係数群、触覚センサに印加される第1の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数またはその第2の関数の第2の係数群、および触覚センサに印加される第2の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数またはその第3の関数の第3の係

10

20

30

40

50

数群を予め記憶する記憶手段と、使用時に、記憶手段に記憶された第1、第2および第3の関数または第1、第2および第3の係数群に基づいて、第1、第2および第3の関数を用いて触覚センサの出力値を圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換する出力変換手段とを備え、触覚センサは、基板と、基板上に異なる向きに設けられ、半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子と、少なくとも3つのセンサ素子を被覆する弾性を有する被覆層と、少なくとも3つのセンサ素子のカンチレバーのピエゾ抵抗の変化により変化する信号をそれぞれ出力する出力回路とを含み、触覚センサの出力値は、少なくとも3つのセンサ素子に対応して出力回路から出力される少なくとも3つの信号を含み、第1の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第1の係数および他の第1の係数を含み、第1の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第1の係数との積和に他の第1の係数を加算する演算式の二乗であり、第2の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第2の係数および他の第2の係数を含み、第2の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第2の係数との積和に他の第2の係数を加算する演算式の二乗であり、第3の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第3の係数および他の第3の係数を含み、第3の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第3の係数との積和に他の第3の係数を加算する演算式の二乗であるものである。

10

【0007】

その触覚センサユニットの触覚センサにおいては、基板上に半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子が異なる向きに設けられ、それらのセンサ素子が弾性を有する被覆層で被覆される。それにより、触覚センサの被覆層に圧力、第1の剪断力および第2の剪断力が印加されると、センサ素子から印加された圧力、第1の剪断力および第2の剪断力に対応する出力値が与えられる。

20

【0008】

記憶手段には、触覚センサに印加される圧力と触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数またはその第1の関数の第1の係数群、触覚センサに印加される第1の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数またはその第2の関数の第2の係数群、および触覚センサに印加される第2の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数またはその第3の関数の第3の係数群が予め記憶される。触覚センサユニットの使用時には、記憶手段に記憶された第1、第2および第3の関数または第1、第2および第3の係数群に基づいて、第1、第2および第3の関数を用いて出力変換手段により触覚センサの出力値が圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換される。

30

【0009】

それにより、触覚センサの特性にばらつきがある場合または複数のセンサ素子間で特性が異なる場合にも、触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を同時にかつ簡単な処理で高精度に検出することができる。

【0012】

(2) センサ素子の各々は、基板上に第1の膜からなる支持部および第2の膜からなる可動部をこの順に備え、第2の膜は半導体材料からなり、第1の格子定数を有する第1の層と、第1の格子定数よりも小さな第2の格子定数を有する第2の層とを順に含み、第1および第2の層の少なくとも一方は、不純物元素の添加により一導電性を有し、第1の格子定数と第2の格子定数との差に起因して可動部が湾曲するとともに、可動部の一部が支持部を介して基板に固定され、可動部がカンチレバーであってもよい。

40

【0013】

この場合、各センサ素子のピエゾ抵抗の変化量を検出することにより、被覆層の表面に印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力をより高感度で検出することができる。

【0014】

(3) 触覚センサユニットは、触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2

50

の剪断力と触覚センサの出力値とに基づいて第1、第2および第3の係数群を算出する算出手段をさらに備えてもよい。

【0015】

この場合、任意のタイミングで触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と触覚センサの出力値とに基づいて第1、第2および第3の係数群が算出手段により算出され、算出された第1、第2および第3の係数群をそれぞれ含む第1、第2および第3の関数、または第1、第2および第3の係数群が記憶手段に記憶される。それにより、任意のタイミングで触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と触覚センサの出力値との関係を修正することができる。

【0016】

(4) 第2の発明に係る触覚センサユニットの製造方法は、印加された圧力ならびに互いに異なる方向の第1および第2の剪断力に対応する出力値を与える触覚センサと、触覚センサに印加される圧力と触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数またはその第1の関数の第1の係数群、触覚センサに印加される第1の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数またはその第2の関数の第2の係数群、および触覚センサに印加される第2の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数またはその第3の関数の第3の係数群を予め記憶するための記憶手段と、触覚センサの出力値を記憶手段に記憶された第1、第2および第3の関数または第1、第2および第3の係数群に基づいて、第1、第2および第3の関数を用いて圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換する出力変換手段とを作製する工程と、触覚センサに圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を印加するとともに触覚センサの出力値を取得する工程と、印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と取得される出力値とに基づいて第1、第2および第3の係数群を算出する工程と、算出された第1、第2および第3の係数群をそれぞれ含む第1、第2および第3の関数、または第1、第2および第3の係数群を記憶手段に記憶させる工程とを備え、触覚センサは、基板と、基板上に異なる向きに設けられ、半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子と、少なくとも3つのセンサ素子を被覆する弾性を有する被覆層と、少なくとも3つのセンサ素子のカンチレバーのピエゾ抵抗の変化により変化する信号をそれぞれ出力する出力回路とを含み、触覚センサの出力値は、少なくとも3つのセンサ素子に対応して出力回路から出力される少なくとも3つの信号を含み、第1の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第1の係数および他の第1の係数を含み、第1の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第1の係数との積和に他の第1の係数を加算する演算式の二乗であり、第2の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第2の係数および他の第2の係数を含み、第2の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第2の係数との積和に他の第2の係数を加算する演算式の二乗であり、第3の係数群は、少なくとも3つの信号にそれぞれ対応して予め決定された値をそれぞれ有する複数の第3の係数および他の第3の係数を含み、第3の関数は、少なくとも3つの信号とそれぞれに対応する第3の係数との積和に他の第3の係数を加算する演算式の二乗であるものである。

【0017】

その製造方法によれば、触覚センサ、記憶手段および出力変換手段が作製される。次に、触覚センサに圧力、第1の剪断力および第2の剪断力が印加されるとともに触覚センサの出力値が取得される。そして、印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力と取得される出力値とに基づいて触覚センサに印加される圧力と触覚センサの出力値との関係を示す第1の関数の第1の係数群、触覚センサに印加される第1の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第2の関数の第2の係数群、および触覚センサに印加される第2の剪断力と触覚センサの出力値との関係を示す第3の関数の第3の係数群が算出される。その後、算出された第1、第2および第3の係数群をそれぞれ含む第1、第2および第3の関数、または第1、第2および第3の係数群が記憶手段に記憶される。

【0018】

10

20

30

40

50

このようにして製造された触覚センサユニットの触覚センサにおいては、基板上に半導体材料からなるカンチレバーをそれぞれ有する少なくとも3つのセンサ素子が異なる向きに設けられ、それらのセンサ素子が弾性を有する被覆層で被覆される。それにより、触覚センサの被覆層に圧力、第1の剪断力および第2の剪断力が印加されると、センサ素子から印加された圧力、第1の剪断力および第2の剪断力に対応する出力値が与えられる。

【0019】

記憶手段には、第1、第2および第3の係数群をそれぞれ含む第1、第2および第3の関数、または第1、第2および第3の係数群が予め記憶される。触覚センサユニットの使用時には、記憶手段に記憶された第1、第2および第3の関数または第1、第2および第3の係数群に基づいて、第1、第2および第3の関数を用いて出力変換手段により触覚センサの出力値が圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を示す検出値に変換される。

10

【0020】

それにより、触覚センサの特性にばらつきがある場合または複数のセンサ素子間で特性が異なる場合にも、触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を同時にかつ簡単な処理で高精度に検出することができる。

【発明の効果】

【0021】

本発明によれば、触覚センサの特性にばらつきがある場合または複数のセンサ素子間で特性が異なる場合にも、触覚センサに印加される圧力、第1の剪断力および第2の剪断力を同時にかつ高精度に検出することができる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0022】

以下、本発明の実施の形態に係る触覚センサユニットおよびその製造方法について図面を参照しながら説明する。

【0023】

(1) 触覚センサシステム

図1は本発明の一実施の形態に係る触覚センサシステムを製造するための触覚センサ製造システムの構成を示すブロック図である。

【0024】

図1に示す触覚センサ製造システムは、触覚センサユニット1、関数算出部2および測定装置3により構成される。

30

【0025】

触覚センサユニット1は、触覚センサ200、出力変換部300および関数記憶部400により構成される。

【0026】

触覚センサ200の構成については後述する。出力変換部300は、マイクロコンピュータまたはゲートアレイ等により構成される。関数記憶部400は、ROM(リードオンリメモリ)または不揮発性RAM(ランダムアクセスメモリ)等により構成される。関数算出部2は、パーソナルコンピュータまたはゲートアレイ等により構成される。なお、触覚センサユニット1が関数算出部2を内蔵してもよい。

40

【0027】

測定装置3は、触覚センサユニット1の触覚センサ200に圧力および剪断力を印加するとともに、触覚センサ200に実際に印加された圧力および剪断力を測定する。以下、測定装置3により触覚センサ200に印加された圧力および剪断力の測定値を印加値Fと呼ぶ。

【0028】

触覚センサ200は、印加された圧力および剪断力に応じたデジタル信号を出力する。以下、触覚センサ200から出力されるデジタル信号を出力値Sと呼ぶ。

【0029】

関数算出部2は、触覚センサ200の出力値Sおよび測定装置3から出力される印加値

50

Fに基づいて後述する方法で出力値Sと印加値Fとの関係を示す関数Gまたはその係数Cを算出する。本実施の形態では、関数算出部2は、関数Gとして一次式または二次式の係数を算出する。

【0030】

関数記憶部400は、関数算出部2により算出された関数Gまたはその係数Cを記憶する。本実施の形態では、関数記憶部400は、関数Gとして一次関数または二次関数の係数を記憶する。

【0031】

出力変換部300は、触覚センサユニット1の使用時に、触覚センサ200の出力値Sを関数記憶部400に記憶される関数Gまたはその係数Cを用いて圧力および剪断力に対応する値に変換する。以下、出力変換部300から出力される圧力および剪断力に対応する値を検出値Fcと呼ぶ。

10

【0032】

(2) 触覚センサ200の構成

図2は触覚センサユニット1の触覚センサ200を示す概略斜視図である。

【0033】

図2に示すように、触覚センサ200は、複数のセンサ素子201, 202, 203, 204を含む。本実施の形態では、触覚センサ200は、4つのセンサ素子201, 202, 203, 204を含む。

【0034】

20

センサ素子201, 202, 203, 204は、それぞれカンチレバーCL1, CL2, CL3, CL4を含む。センサ素子201, 202, 203, 204は、共通の結晶シリコン基板101に形成され、共通のエラストマー膜105により被覆されている。

【0035】

以下、結晶シリコン基板101の表面に平行で互いに直交する2つの方向にX軸およびY軸を定義し、結晶シリコン基板101の表面に垂直な方向にZ軸を定義する。結晶シリコン基板101の表面に向かう方向をZ軸の正の方向とする。

【0036】

結晶シリコン基板101には、カンチレバーCL1, CL2, CL3, CL4のピエゾ抵抗の変化量をアナログ電圧の変化量に変換するブリッジ回路、ブリッジ回路の出力電圧を増幅する増幅器および増幅器の出力電圧をデジタル信号の出力値に変換するAD変換器(アナログデジタル変換器)を含む出力回路(図示せず)が形成されている。詳細については後述する。

30

【0037】

センサ素子201のカンチレバーCL1とセンサ素子203のカンチレバーCL3とが互いに対向し、センサ素子202のカンチレバーCL2とセンサ素子204のカンチレバーCL4とが互いに対向する。また、センサ素子201, 203とセンサ素子202, 204とは互いに直交する向きに配置されている。

【0038】

本実施の形態においては、カンチレバーCL1, CL3がX軸方向に沿うようにセンサ素子201, 203が配置され、カンチレバーCL3, CL4がY軸方向に沿うようにセンサ素子202, 204が配置されている。XY面に沿って剪断力が印加され、Z軸の正の方向に圧力が印加される。

40

【0039】

(3) センサ素子の製造方法の一例

図3~図8は図2の触覚センサ200に含まれる1つのセンサ素子の製造方法の一例を示す工程図であり、(a)は模式的断面図、(b)は模式的平面図である。図9はカンチレバーCL1に接続される出力回路の一例を示す回路図である。

【0040】

図3には、1つのセンサ素子201のみが示されるが、他のセンサ素子202, 203

50

、204もセンサ素子201と同時に同様の方法で形成される。

【0041】

まず、図3に示すように、SOI (Silicon On Insulator: 絶縁体上シリコン) 基板1000を用意する。SOI基板1000は、結晶シリコン基板101、埋め込み酸化膜102および結晶シリコン膜103を有する。結晶シリコン膜103の厚さは、例えば、200nmである。埋め込み酸化膜102は、例えば酸化シリコン(SiO_2)からなる。

【0042】

次に、図4に示すように、熱拡散またはイオン注入により結晶シリコン膜103にホウ素(B)を添加する。これにより、結晶シリコン膜103は、ノンドープ層103aとp型のドープ層103bとに分かれる。ドープ層103bの厚さは、例えば、100nmである。また、ドープ層103bにおけるホウ素の濃度は、例えば、0.2原子% ($10^{20}/\text{cm}^3$) である。

10

【0043】

次に、図5に示すように、SOI基板1000の一端側でドープ層103b上に、フォトリソグラフィ、および蒸着またはスパッタリングにより矩形の電極104a, 104bを形成する。電極104a, 104bは、例えば、アルミニウム(Al)からなる。

【0044】

次に、図6に示すように、フォトリソグラフィおよびエッチングにより、電極104a, 104b下の領域および中央部の略U字状の領域を除くノンドープ層103aおよびドープ層103bを除去する。なお、エッチングとしては、例えば、ウェットエッチング法を用いることができる。エッチング液としては、例えば、2,6-ヒドロキシナフトエ酸(HNA)を用いることができる。なお、上記略U字状に残されたノンドープ層103aおよびドープ層103bが後述するカンチレバーCL1となる。

20

【0045】

次に、図7に示すように、エッチングにより埋め込み酸化膜102の所定の領域を除去する。エッチング液としては、例えば、フッ化水素(HF)を用いることができる。

【0046】

ここで、上述したように、ドープ層103bは、結晶シリコン膜103(図2)にホウ素を添加することにより形成されている。また、ドープ層103bにおけるホウ素の濃度は、0.2原子% ($10^{20}/\text{cm}^3$) に設定されている。これにより、ドープ層103bの格子定数は、シリコン(Si)の格子定数(約 5.4295×10^{-10}) に比べて約0.0028小さくなっている。

30

【0047】

この場合、ノンドープ層103aとドープ層103bとの境界面において格子定数の差に起因して歪みが発生する。そのため、埋め込み酸化膜102の上記所定の領域を除去した場合、上記境界面の歪みを緩和するように、図7に示すようにノンドープ層103aおよびドープ層103bの一端側が上方に向かって湾曲する。これにより、XY平面において略U字状でかつXZ平面において湾曲するカンチレバーCL1が形成される。

【0048】

なお、例えば、カンチレバーCL1のXZ平面における曲率半径は約 $400 \mu\text{m}$ であり、カンチレバーCL1の長手方向の長さは約 $600 \mu\text{m}$ である。また、ノンドープ層103aとドープ層103bとの間に発生する歪みは、例えば、約 5×10^{-4} である。

40

【0049】

次に、図7の状態、水洗浄、IPA (イソプロピルアルコール) 置換、およびt-ブチルアルコール置換を行う。その後、フリーズドライ(真空凍結乾燥)を行う。

【0050】

次に、図8に示すように、結晶シリコン基板101上で、埋め込み酸化膜102、ノンドープ層103a、ドープ層103bおよび電極104a, 104bをエラストマー層105に埋設する。これにより、センサ素子201が完成する。なお、エラストマー層105としては、例えば、アクリル樹脂、エポキシ樹脂またはシリコン樹脂等を用いることが

50

できる。本実施の形態においては、P D M S（ポリジメチルシロキサン：polydimethylsiloxane）樹脂を用いる。

【0051】

このようにして作製されたセンサ素子201においては、略U字形状を有するp型のドーブ層103bの一端に電極104aが形成され、他端に電極104bが形成されている。これにより、ドーブ層103bを、 piezo抵抗素子として機能させることができる。

【0052】

エラストマー層105に圧力または剪断力が印加されると、エラストマー層105の内部応力が変化し、カンチレバーCL1が変形する。それにより、ドーブ層103bの piezo抵抗が変化する。

10

【0053】

図9に示すように、カンチレバーCL1の電極104a, 104bには、外部抵抗R1, R2, R3が接続され、カンチレバーCL1、外部抵抗R1, R2, R3および直流電源211によりブリッジ回路210が構成されている。ブリッジ回路210の出力電圧は増幅器230に与えられ、増幅器230の出力電圧がAD変換器240に入力される。なお、図2のカンチレバーCL2, CL3, CL4にも、図9の出力回路と同様の出力回路が接続される。

【0054】

ここで、カンチレバーCL1の変形によりカンチレバーCL1の piezo抵抗が変化する。この piezo抵抗の変化量がブリッジ回路210および増幅器230により電圧の変化として検出される。さらに、増幅器230の出力電圧がAD変換器240によりデジタル信号の出力値S1に変換される。その結果、圧力および剪断力の大きさを検出することができる。

20

【0055】

また、カンチレバーCL1は、一端側が斜め上方に向かって湾曲している。このため、エラストマー層105において、図8に示す矢印Aの方向に剪断力が印加された場合、カンチレバーCL1は曲率半径が大きくなるように変形する。一方、エラストマー層105において、図8に示す矢印Bの方向に剪断力が印加された場合、カンチレバーCL1は曲率半径が小さくなるように変形する。さらに、エラストマー層105において、図8に矢印Cの方向に圧力が印加された場合、カンチレバーCL1は曲率半径が大きくなるように変形する。

30

【0056】

そのため、矢印Aの方向に剪断力が印加された場合と矢印Bの方向に剪断力が印加された場合とは、ドーブ層103bの piezo抵抗の変化の方向（増加する方向または減少する方向）が逆になる。また、矢印Cの方向に圧力が印加された場合は、ドーブ層103bの piezo抵抗の変化の方向がそのカンチレバーCL1の近傍の他のカンチレバー（図2におけるカンチレバーCL2, CL3, CL4）の piezo抵抗の変化の方向と同じになる。つまり、 piezo抵抗の変化の方向および変化量を検出することにより、エラストマー層105に印加される剪断力および圧力の方向および大きさを判別することができる。

【0057】

他のセンサ素子202, 203, 204の動作は、センサ素子201の動作と同様である。

40

【0058】

（4）触覚センサ200による圧力および剪断力の検出

図2の触覚センサ200において、センサ素子201, 202, 203, 204の出力値をそれぞれS1, S2, S3, S4とする。ここで、 $S = (S1, S2, S3, S4)$ である。

【0059】

触覚センサ200においては、センサ素子201, 203が互いに対向しかつX軸方向に沿うように配置され、センサ素子202, 204が互いに対向しかつY軸方向に沿うよ

50

うに配置されている。この場合、4つのセンサ素子201, 202, 203, 204の出力値 S_1, S_2, S_3, S_4 に基づいて、触覚センサ200に印加される圧力および剪断力を検出することができる。

【0060】

(5) 測定装置3の構成

図10は図1の測定装置3の構成の一例を示す模式図である。図10において、測定装置3は、コンピュータ30、Z軸駆動装置31、6軸力センサ32、加圧軸33、円盤状の加圧板34、XYステージ35およびXY軸駆動装置36により構成される。

【0061】

XYステージ35上に触覚センサ200が設置される。加圧軸33は、Z軸駆動装置31の下部に6軸力センサ32を介してZ軸に沿って取り付けられる。加圧軸33の下端に加圧板34がXY平面に平行に取り付けられる。Z軸駆動装置31およびXY軸駆動装置36は、コンピュータ30により制御される。

10

【0062】

コンピュータ30は、Z軸駆動装置31に圧力の目標値 F_p を与えると同時に、XY軸駆動装置36にX軸方向およびY軸方向の剪断力の目標値 F_{sx}, F_{sy} を与える。

【0063】

Z軸駆動装置31は、目標値 F_p に基づいて、加圧板34が触覚センサ200に接した状態で矢印Pで示すように加圧軸33を+Z軸方向に駆動する。それにより、触覚センサ200に圧力が印加される。

20

【0064】

また、XY軸駆動装置36は、目標値 F_{sx} に基づいて、矢印Qで示すようにXYステージ35を+X軸方向および-X軸方向に駆動する。それにより、触覚センサ200に±X軸方向の剪断力が印加される。さらに、XY軸駆動装置36は、目標値 F_{sy} に基づいて、加圧板34が触覚センサ200に接した状態でXYステージ35を+Y軸方向および-Y軸方向に駆動する。それにより、触覚センサ200に±Y軸方向の剪断力が印加される。

【0065】

6軸力センサ32は、±X軸方向、±Y軸方向および±Z軸方向の力を測定し、測定値 F' を出力する。コンピュータ30は、6軸力センサ32の測定値 F' を印加値 F として出力する。

30

【0066】

(6) 関数Gおよび係数Cの算出処理

関数Gおよび係数Cの算出処理は、触覚センサユニット1の製造時または製造後で出荷前の調整時に行われる。

【0067】

印加値 F は、X軸方向の剪断力の印加値 F_x 、Y軸方向の剪断力の印加値 F_y およびZ軸方向の圧力の印加値 F_z からなる。また、関数Gは触覚センサ200の出力値 S とX軸方向の剪断力の印加値 F_x との関係を示す関数 G_x 、触覚センサ200の出力値 S とY軸方向の剪断力の印加値 F_y との関係を示す関数 G_y および触覚センサ200の出力値 S とZ軸方向の圧力の印加値 F_z との関係を示す関数 G_z からなる。さらに、触覚センサ200の出力値 S はセンサ素子201, 202, 203, 204の出力値 S_1, S_2, S_3, S_4 からなる。すなわち、印加値 F 、関数Gおよび出力値 S は次のようになる。

40

【0068】

$$F = (F_x, F_y, F_z)$$

$$G = (G_x, G_y, G_z)$$

$$S = (S_1, S_2, S_3, S_4)$$

$$F_x = G_x(S_1, S_2, S_3, S_4) \dots (a1)$$

$$F_y = G_y(S_1, S_2, S_3, S_4) \dots (a2)$$

$$F_z = G_z(S_1, S_2, S_3, S_4) \dots (a3)$$

50

まず、関数 G を算出するための教師データの取得処理を説明する。ここで、測定装置 3 による測定回数を N とする。各測定で得られる印加値 F を F_i とし、触覚センサ 200 の出力値 S を S_i とする。ここで、 i は 1 から N までの自然数である。印加値 F_i と出力値 S_i との組み合わせ (F_i, S_i) を教師データと呼ぶ。

【0069】

図 11 は関数 G の決定処理を示すフローチャートである。まず、測定装置 3 の XY ステージ 35 上に触覚センサ 200 を設置する。また、測定装置 3 のコンピュータ 30 に測定回数 N を入力するとともに触覚センサ 200 に印加する圧力および剪断力の範囲を入力する。

【0070】

最初に、コンピュータ 30 は変数 i を N に設定する (ステップ S101)。次に、コンピュータ 30 は、入力された範囲内において触覚センサ 200 に印加する圧力および剪断力を決定する (ステップ S102)。この場合、入力された範囲内で圧力および剪断力をランダムに選択してもよく、あるいは均一に分散するように選択してもよい。

【0071】

次いで、Z 軸駆動装置 31 が加圧軸 33 を Z 軸方向に駆動する (ステップ S103)。また、XY 軸駆動装置 36 が XY ステージ 35 を X 軸方向および Y 軸方向に駆動する (ステップ S104)。それにより、触覚センサ 200 に圧力および剪断力が印加される。

【0072】

この状態で 6 軸力センサ 32 が $\pm X$ 軸方向、 $\pm Y$ 軸方向および $\pm Z$ 軸方向の力を測定する (ステップ S105)。コンピュータ 30 は、6 軸力センサ 32 の測定値 F' が決定された圧力および剪断力にほぼ達したか否かを判定する (ステップ S106)。測定値 F' が決定された圧力および剪断力にほぼ達していない場合には、ステップ S103 に戻り、ステップ S103 ~ S106 の処理を繰り返す。

【0073】

測定値 F' が決定された圧力および剪断力にほぼ達した場合には、コンピュータ 30 は測定値 F' を印加値 F_i として図 1 の関数算出部 2 に出力する。関数算出部 2 は、印加値 F_i を記憶する (ステップ S107)。また、関数算出部 2 は、このときの触覚センサ 200 の出力値 S_i を記憶する (ステップ S108)。それにより、関数算出部 2 に、教師データ (F_i, S_i) が記憶される。

【0074】

次に、コンピュータ 30 は、変数 i から 1 を減算する (ステップ S109)。その後、コンピュータ 30 は、変数 i が 0 となったか否かを判定する (ステップ S110)。変数 i が 0 でない場合には、ステップ S102 に戻り、ステップ S102 ~ S110 の処理を繰り返す。

【0075】

変数 i が 0 の場合には、関数算出部 2 は N 組の教師データ $(F_1, S_1) \sim (F_N, S_N)$ を用いて後述する方法で関数 G を算出する (ステップ S111)。

【0076】

次に、教師データ $(F_1, S_1) \sim (F_N, S_N)$ を用いた関数 G の算出方法について説明する。

【0077】

各組の教師データ (F_i, S_i) により次の関数 G が定義される。

【0078】

$$F_i = G(S_i) \quad \dots (a4)$$

実際には、印加値 F_i および出力値 S_i には種々の誤差が含まれるため、すべての組の教師データ (F_i, S_i) に共通の関数 G は求まらない。そこで、すべての組の教師データ (F_i, S_i) で最も誤差が小さくなるように単一の関数 G を算出する。

【0079】

単一の関数 G を用いることにより生じる誤差 e_i を次式のように定義する。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 0 】

$$e_i = F_i - G(S_i) \quad \dots (a5)$$

次式のように、すべての誤差 e_i の自乗和 E が最小になる場合、すべての組の教師データ (F_i, S_i) について誤差 e_i が最小となる。

【 0 0 8 1 】

$$e_i^2 = E \quad 0 \quad \dots (a6)$$

上式において、 i は $i = 1$ から $i = N$ までの和を表す。上式の自乗和 E は 0 以上になるので、自乗和 E を関数 G_x, G_y, G_z で偏微分した値が 0 となる変曲点で自乗和 E が最小となる。

【 0 0 8 2 】

$$E / G_x = E / G_y = E / G_z = 0 \quad \dots (a7)$$

したがって、自乗和 E が最小となるように最小自乗法により関数 G_x, G_y, G_z を算出する。算出された関数 G_x, G_y, G_z は図 1 の関数記憶部 400 に記憶される。

【 0 0 8 3 】

触覚センサ 200 の出力値 S と X 軸方向の剪断力の印加値 F_x との関係を示す関数 G_x 、触覚センサ 200 の出力値 S と Y 軸方向の剪断力の印加値 F_y との関係を示す関数 G_y および触覚センサ 200 の出力値 S と Z 軸方向の圧力の印加値 F_z との関係を示す関数 G_z をそれぞれ線形の 1 次式とすると、関数 G_x, G_y, G_z は次式で表される。

【 0 0 8 4 】

$$F_x = G_x(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (b1)$$

$$= [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ 1] [C_{1x} \ C_{2x} \ C_{3x} \ C_{4x} \ C_{5x}]^T$$

$$\dots (b1)$$

$$= C_{1x} \cdot S_1 + C_{2x} \cdot S_2 + C_{3x} \cdot S_3 + C_{4x} \cdot S_4 + C_{5x}$$

$$F_y = G_y(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (b2)$$

$$= [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ 1] [C_{1y} \ C_{2y} \ C_{3y} \ C_{4y} \ C_{5y}]^T$$

$$= C_{1y} \cdot S_1 + C_{2y} \cdot S_2 + C_{3y} \cdot S_3 + C_{4y} \cdot S_4 + C_{5y}$$

$$\dots (b2)$$

$$F_z = G_z(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (b3)$$

$$= [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ 1] [C_{1z} \ C_{2z} \ C_{3z} \ C_{4z} \ C_{5z}]^T$$

$$= C_{1z} \cdot S_1 + C_{2z} \cdot S_2 + C_{3z} \cdot S_3 + C_{4z} \cdot S_4 + C_{5z}$$

$$\dots (b3)$$

上記のように、 N 組の教師データ (F_i, S_i) を用いて最小自乗法により係数 $C_{1x} \sim C_{5x}$ 、 $C_{1y} \sim C_{5y}$ 、 $C_{1z} \sim C_{5z}$ を算出することができる。算出された係数 $C_{1x} \sim C_{5x}$ 、 $C_{1y} \sim C_{5y}$ 、 $C_{1z} \sim C_{5z}$ は、図 1 の関数記憶部 400 に記憶される。ここで、係数 C は、係数 $C_{1x} \sim C_{5x}$ 、 $C_{1y} \sim C_{5y}$ 、 $C_{1z} \sim C_{5z}$ を要素とする行列式である。

【 0 0 8 5 】

なお、関数 G_x, G_y, G_z をそれぞれ 2 次式とすると、関数 G_x, G_y, G_z は次式で表される。

【 0 0 8 6 】

$$F_x = G_x(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (c1)$$

$$= (C_{1x} \cdot S_1 + C_{2x} \cdot S_2 + C_{3x} \cdot S_3 + C_{4x} \cdot S_4 + C_{5x})^2$$

$$\dots (c1)$$

$$F_y = G_y(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (c2)$$

$$= (C_{1y} \cdot S_1 + C_{2y} \cdot S_2 + C_{3y} \cdot S_3 + C_{4y} \cdot S_4 + C_{5y})^2$$

$$\dots (c2)$$

$$F_z = G_z(S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (c3)$$

$$= (C_{1z} \cdot S_1 + C_{2z} \cdot S_2 + C_{3z} \cdot S_3 + C_{4z} \cdot S_4 + C_{5z})^2$$

$$\dots (c3)$$

(7) 出力変換処理

10

20

30

40

50

出力変換部 300 による出力変換処理は、触覚センサユニット 1 を用いて実際に圧力および剪断力を検出する際に行われる。

【0087】

図 12 は出力変換部 300 による出力変換処理を示すフローチャートである。

【0088】

触覚センサ 200 に圧力および剪断力が印加された状態で、出力変換部 300 は、関数記憶部 400 から関数 G を読み出す (ステップ S121)。ここで、 $G = (G_x, G_y, G_z)$ である。本実施の形態では、出力変換部 300 は、関数記憶部 400 から 1 次式または 2 次式の係数 C を読み出す。

【0089】

また、出力変換部 300 は、触覚センサ 200 の出力値 S を読み込む (ステップ S122)。ここで、 $S = (S_1, S_2, S_3, S_4)$ である。

【0090】

そして、出力変換部 300 は、関数 G を用いて出力値 S から検出値 F_c を次式により算出する (ステップ S123)。それにより、触覚センサユニット 1 から検出値 F_c が出力される。ここで、検出値 F_c は、X 軸方向の剪断力の検出値 F_{cx} 、Y 軸方向の剪断力の検出値 F_{cy} および Z 軸方向の圧力の検出値 F_{cz} からなる。すなわち、 $F_c = (F_{cx}, F_{cy}, F_{cz})$ である。

【0091】

$$F_{cx} = G_x (S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (d1)$$

$$F_{cy} = G_y (S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (d2)$$

$$F_{cz} = G_z (S_1, S_2, S_3, S_4) \quad \dots (d3)$$

本実施の形態では、図 1 の関数記憶部 400 に 1 次式の係数 $C_{1x} \sim C_{5x}$ 、 $C_{1y} \sim C_{5y}$ 、 $C_{1z} \sim C_{5z}$ が記憶される。したがって、検出値 F_{cx} 、 F_{cy} 、 F_{cz} は次式より算出される。

【0092】

$$F_{cx} = C_{1x} \cdot S_1 + C_{2x} \cdot S_2 + C_{3x} \cdot S_3 + C_{4x} \cdot S_4 + C_{5x} \quad \dots (e1)$$

$$F_{cy} = C_{1y} \cdot S_1 + C_{2y} \cdot S_2 + C_{3y} \cdot S_3 + C_{4y} \cdot S_4 + C_{5y} \quad \dots (e2)$$

$$F_{cz} = C_{1z} \cdot S_1 + C_{2z} \cdot S_2 + C_{3z} \cdot S_3 + C_{4z} \cdot S_4 + C_{5z} \quad \dots (e3)$$

なお、図 1 の関数記憶部 400 に 2 次式の係数 $C_{1x} \sim C_{5x}$ 、 $C_{1y} \sim C_{5y}$ 、 $C_{1z} \sim C_{5z}$ が記憶される場合には、検出値 F_{cx} 、 F_{cy} 、 F_{cz} は次式より算出される。

【0093】

$$F_{cx} = (C_{1x} \cdot S_1 + C_{2x} \cdot S_2 + C_{3x} \cdot S_3 + C_{4x} \cdot S_4 + C_{5x})^2 \quad \dots (f1)$$

$$F_{cy} = (C_{1y} \cdot S_1 + C_{2y} \cdot S_2 + C_{3y} \cdot S_3 + C_{4y} \cdot S_4 + C_{5y})^2 \quad \dots (f2)$$

$$F_{cz} = (C_{1z} \cdot S_1 + C_{2z} \cdot S_2 + C_{3z} \cdot S_3 + C_{4z} \cdot S_4 + C_{5z})^2 \quad \dots (f3)$$

(8) 実施の形態の効果

本実施の形態に係る触覚センサユニット 1 においては、触覚センサ 200 への印加値 F と触覚センサ 200 からの出力値 S との関係を示す関数 G または係数 C が関数記憶部 400 に予め記憶される。そして、触覚センサユニット 1 の実際の使用時に、触覚センサ 200 からの出力値 S が関数記憶部 400 に記憶された関数 G または係数 C を用いて検出値 F_c に変換される。それにより、触覚センサ 200 の特性にばらつきがある場合またはセンサ素子 201、202、203、204 間で特性が異なる場合にも、触覚センサ 200 に印加される圧力および剪断力を同時にかつ高精度に検出することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 4 】

(9) 構造模型によるシミュレーション

(a) 構造模型の作製

ここで、上記実施の形態に係る触覚センサユニット 1 により同時にかつ高精度で圧力および剪断力を検出可能であることを実証するためにシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、触覚センサ 2 0 0 を模擬した構造模型を用いた。

【 0 0 9 5 】

構造模型は次のように作製した。燐青銅（幅 5 mm、長さ 2 0 mm および厚さ 0 . 1 mm）を素材として数十ミリメートルのカンチレバーを 4 つ形成した。各カンチレバーに予め反り（高さ方向に 1 0 mm 程度）を持たせた。4 つのカンチレバーを図 2 の触覚センサ 2 0 0 の立体構造と相似形になるようにプレート上に対向させて配置し、プレートにネジ止めした。各カンチレバーの下面には、歪みゲージ（東京測器研究所製 F L A - 5 - 1 1 - 3 L ; 全体の幅 3 mm、全体の長さ 1 0 mm、ゲージ部の幅 1 . 5 mm および長さ 5 mm）を瞬間接着剤にて固定した。これらのカンチレバーをプレート面からの厚みが 1 2 mm 程度になるようにシリコンゴム（信越化学工業製 K E - 1 0 9 ; ヤング率 0 . 8 4 M P a）で覆った。

【 0 0 9 6 】

(b) 構造模型を用いたシミュレーションの方法

上記の構造模型に圧力および剪断力を印加し、歪みゲージより得られる値を観察することにより、想定した変形の傾向が観察できるか否かを確認した。

【 0 0 9 7 】

まず、構造模型に圧力および剪断力を同時かつ正確に印加するために加圧実験装置として図 1 0 の測定装置 3 を用意した。X Y ステージ 3 5 上に構造模型を設置し、直径 3 0 mm の加圧板 3 4 の中心を構造模型のほぼ中央に配置した。加圧軸 3 3 には 6 軸力センサ 3 2（ニッタ製 I F S - 2 0 E 1 2 A 1 5 - I 2 5 - E X）が取り付けられている。加圧板 3 4 により構造模型に印加されている圧力および剪断力が 6 軸力センサ 3 2 により常に測定される。測定装置 3 は、印加される圧力および剪断力の目標値 F_p 、 F_{s_x} 、 F_{s_y} と 6 軸力センサ 3 2 による測定値 F' とを比較し、比較結果に基づいてフィードバック制御により加圧軸 3 3 および X Y ステージ 3 5 の移動量を調整する。

【 0 0 9 8 】

なお、測定装置 3 の精度上、コンピュータ 3 0 より与えられる圧力および剪断力の目標値 F_p 、 F_{s_x} 、 F_{s_y} と構造模型に実際に印加された圧力および剪断力との間には若干の誤差が生じる。そこで、以降の測定では、6 軸力センサ 3 2 の測定値 F' を構造模型に実際に印加された真の印加値 F とする。

【 0 0 9 9 】

(c) 歪みの測定方法

歪みゲージの抵抗変化を検出するためには、一般的にはブリッジ回路および増幅器により抵抗変化を電圧変化に変換する手法が採られる。ここでも、同様に、ブリッジ回路およびストレインアンプ（TEAC 製 S A - 1 5 0）を用いて抵抗変化を電圧変化に変換し、その電圧を A D 変換器（CONTREC 製 A I - 1 6 0 8 A Y - U S B）を介してコンピュータ 3 0 に入力した。なお、本シミュレーションでは、1 0 . 5 V が 2 0 0 0 μ の歪みに相当する。

【 0 1 0 0 】

(d) 構造模型への印加値 F および構造模型からの出力値 S の測定方法

上記の測定装置 3 を用いて構造模型に圧力および剪断力を印加し、印加値 F と構造模型の出力値 S との関係を観察した。

【 0 1 0 1 】

図 2 の触覚センサ 2 0 0 と同様に、第 1 番目および第 3 番目のカンチレバーの向く方向を $\pm X$ 軸方向と定義し、第 2 番目および第 4 番目のカンチレバーの向く方向を $\pm Y$ 軸方向と定義する。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 2 】

圧力の目標値 F_p は、3段階（7.1 kPa、14.1 kPa および 21.2 kPa）に設定した。剪断力の目標値 F_{sx} 、 F_{sy} は、圧力と同程度の力を最大値として5段階に設定した。剪断力は + X 軸方向、- X 軸方向、+ Y 軸方向および - Y 軸方向の4方向に印加した。

【 0 1 0 3 】

また、上記実施の形態における触覚センサ 200 と同様に第1番目～第4番目のカンチレバーの出力値を S_1 、 S_2 、 S_3 および S_4 とする。

【 0 1 0 4 】

ここで、圧力および剪断力の印加時には、目標値 F_p 、 F_{sx} 、 F_{sy} 付近で加圧軸 3 3 および XY ステージ 3 5 を5秒程度停止させ、停止中に6軸力センサ 3 2 の測定値を1秒間隔で3回取得した。このように取得した6軸力センサ 3 2 の測定値の平均値を印加値 F として用いた。

【 0 1 0 5 】

構造模型の各カンチレバーの変形量を歪みゲージ、ストレインアンプおよびAD変換器を介して電圧値で取得した。各カンチレバーについて上記停止時間に100m秒間隔で取得した電圧値のデータのうち30フレーム分のデータの平均値を出力値 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 として用いた。

【 0 1 0 6 】

(e) 構造模型への印加値 F および構造模型からの出力値 S の測定結果

(e-1) 圧力の印加値とカンチレバーの出力値との関係

図13は圧力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。図13の横軸は構造模型に印加したZ軸方向の圧力の印加値 F_z を示し、縦軸は4つのカンチレバーからの出力値 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 を示す。上記のように、構造模型に3段階の圧力を4回ずつ印加し、合計12回の測定における4つのカンチレバーからの出力値 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 を取得した。

【 0 1 0 7 】

なお、実際には、若干の剪断力も生じているが、ここでは、その影響を考慮した図示はしていない。生じていた剪断力の絶対値の平均は1.00 kPaであり、標準偏差は0.50であった。

【 0 1 0 8 】

図13に示すように、出力値 S_1 、 S_2 、 S_4 については、圧力の変化に対してほぼ同様に線形に変化していることがわかる。一方、出力値 S_3 については、他の出力値 S_1 、 S_2 、 S_4 と異なる変化が得られた。この原因としては、カンチレバーごとのわずかな構造の違い、歪みゲージの接着状態の違い等が考えられる。しかしながら、出力値 S_3 についても、切片0の回帰直線との相関係数は0.82と比較的高くなった。

【 0 1 0 9 】

(e-2) 剪断力の印加値とカンチレバーの出力値との関係

図14はX軸方向の剪断力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。図15はY軸方向の剪断力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。

【 0 1 1 0 】

図14の横軸は構造模型に印加した±X軸方向の剪断力の印加値 F_x を示し、縦軸は4つのカンチレバーからの出力値 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 を示す。また、図15の横軸は構造模型に印加した±Y軸方向の剪断力の印加値 F_y を示し、縦軸は4つのカンチレバーからの出力値 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 を示す。

【 0 1 1 1 】

構造模型に3段階の圧力および5段階の剪断力の組み合わせで合計15回の測定を直交する4方向（±X軸方向および±Y軸方向）で合計60回行った。

【 0 1 1 2 】

10

20

30

40

50

図14から、±X軸方向の剪断力について、出力値S1, S2の組は変化するが、出力値S3, S4の組はほとんど変化しないことがわかる。逆に、図15から、±Y軸方向の剪断力について、出力値S3, S4の組は変化するが、出力値S1, S2の組はほとんど変化しないことがわかる。

【0113】

以上の結果から、対向するカンチレバーの組ごとに独立して各軸方向の剪断力の検出が可能であることが読み取れる。また、各軸方向の出力値S1, S2, S3, S4の変化傾向には線形関数との強い相関があることも読み取れる。

【0114】

なお、図14および図15の結果を図13の結果と比較すると、剪断力の変化に対する出力値S1, S2, S3, S4の変化は、圧力の変化に対する出力値S1, S2, S3, S4の変化に比べて大きくなっている。それにより、上記実施の形態の触覚センサ200における検出原理では、圧力に比べて剪断力がより強く反応することがわかる。

10

【0115】

(f) カンチレバーからの出力値による圧力および剪断力の検出値の推定

(f-1) 関係を求める実験

上記のシミュレーションより、構造模型への印加値Fx, Fy, Fzと構造模型からの出力値S1, S2, S3, S4との間には、一定の関係性が見られることがわかった。

【0116】

そこで、上記のシミュレーションにより取得した合計72組の教師データを用いて上式(a4)~(a7), (b1)~(b3)より、印加値Fx, Fy, Fzと出力値S1, S2, S3, S4との関係を示す1次式の係数Cを算出した。同様に、合計72組の教師データを用いて上式(a4)~(a7), (c1)~(c3)より、印加値Fx, Fy, Fzと出力値S1, S2, S3, S4との関係を示す2次式の係数Cを算出した。

20

【0117】

さらに、算出された1次式の係数Cを用いて上式(e1)~(e3)より構造模型の出力値S1, S2, S3, S4から圧力の検出値Fczおよび剪断力の検出値Fcx, Fcyを推定した。同様に、算出された2次式の係数Cを用いて上式(f1)~(f3)より構造模型の出力値S1, S2, S3, S4から圧力の検出値Fczおよび剪断力の検出値Fcx, Fcyを推定した。

30

【0118】

表1に実際の印加値Fx, Fy, Fzと推定された検出値Fcx, Fcy, Fzとの差の絶対値平均を示し、括弧内にそれらの標準偏差を示す。単位はkPaである。

【0119】

【表1】

	X軸方向の 剪断力	Y軸方向の 剪断力	Z軸方向の 圧力
1次式	0.24 (0.21)	0.22 (0.24)	2.52 (1.97)
2次式	0.17 (0.16)	0.16 (0.16)	0.80 (0.58)

40

【0120】

表1の結果から、2次式によれば1次式よりも実際の印加値Fx, Fy, Fzと推定された検出値Fcx, Fcy, Fzとの間の関係性を良く表していることがわかる。

【0121】

(f-2) 推定実験

次に、上記の測定とは別に取得した合計90組のデータを用いて、上記の印加値Fx, Fy, Fzと出力値S1, S2, S3, S4との関係を示す1次式および2次式の係数Cから、圧力および剪断力に対する検出値Fcx, Fcy, Fczを算出した。この場合、

50

剪断力を印加する方向としてX Y平面内でZ軸を中心として0度から270度の範囲より6方向を選択した。

【0122】

図16はZ軸方向の圧力の印加値と検出値との関係を示す図である。図17はX軸方向の剪断力の印加値と検出値との関係を示す図である。図18はY軸方向の剪断力の印加値と検出値との関係を示す図である。

【0123】

図16～図18の横軸は実際の圧力の印加値 F_z および剪断力の印加値 F_x , F_y を示し、縦軸は出力値 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 から算出された圧力の検出値 F_{cz} および剪断力の検出値 F_{cx} , F_{cy} を示す。

10

【0124】

図16～図18において、点線で示された真の値からの検出値 F_{cx} , F_{cy} , F_{cz} の乖離が小さいほど誤差が少ない。

【0125】

図17および図18の結果によれば、剪断力については、1次式を用いた場合にも2次式を用いた場合にも、検出値の精度が高くなった。

【0126】

一方、図16の結果によれば、圧力については、関数Gを1次式とした場合に、印加値 F_z と検出値 F_{cz} との誤差の絶対値平均が3.16kPaとなり、標準偏差が2.60となった。関数Gを2次式とした場合には、印加値 F_z と検出値 F_{cz} との誤差の絶対値平均が5.01kPaとなり、標準偏差が5.22となった。それにより、圧力については、1次式を用いた検出値 F_{cz} の精度が2次式を用いた検出値 F_{cz} の精度よりも高くなった。これは、圧力については、教師データの個数が少なかったためであると推察される。したがって、高い精度で圧力および剪断力を検出するためには、より多くの教師データを取得することが望ましい。

20

【0127】

(g) 評価

上記のシミュレーションの結果から、予め構造模型への圧力および剪断力の印加値 F_x , F_x , F_z と構造模型からの出力値 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 との関係を示す関数Gまたは係数Cを算出することにより、構造模型からの出力値 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 から構造模型への圧力および剪断力の検出値 F_{cx} , F_{cy} , F_{cz} を同時にかつ高精度に検出可能であることがわかった。

30

【0128】

また、4つのカンチレバーのうちいずれかのカンチレバーの特性が他のカンチレバーの特性と異なる場合でも、構造模型に印加される圧力および剪断力の検出値 F_{cx} , F_{cy} , F_{cz} を同時にかつ高精度に検出することができることがわかった。

【0129】

したがって、上記実施の形態に係る触覚センサユニット1によれば、触覚センサ200の特性にばらつきがある場合またはセンサ素子201, 202, 203, 204間で特性が異なる場合にも、触覚センサ200に印加される圧力および剪断力の検出値 F_{cx} , F_{cy} , F_{cz} を同時にかつ高精度に検出することができることがわかった。

40

【0130】

(10) 請求項の各構成要素と実施の形態の各部との対応

以下、請求項の各構成要素と実施の形態の各部との対応の例について説明するが、本発明は下記の例に限定されない。

【0131】

上記実施の形態では、触覚センサ201, 202, 203, 204が3つ以上の触覚センサの例であり、関数記憶部400が記憶手段の例であり、出力変換部300が出力変換手段の例である。また、結晶シリコン基板101が基板の例であり、埋め込み酸化膜102が第1の膜または支持部の例であり、結晶シリコン膜103が第2の膜の例であり、カ

50

ンチレバー $CL1$, $CL2$, $CL3$, $CL4$ が可動部の例であり、ノンドープ層 $103a$ が第1の層の例であり、ドープ層 $103b$ が第2の層の例であり、エラストマー層 105 が被覆層の例である。

さらに、X軸方向の剪断力が第1の剪断力の例であり、Y軸方向の剪断力が第2の剪断力の例であり、センサ素子 201 , 202 , 203 , 204 の出力値 $S1$, $S2$, $S3$, $S4$ が少なくとも3つの信号の例であり、式 $c1$ の関数 Gx が第1の関数の例であり、係数 $C1x$, $C2x$, $C3x$, $C4x$, $C5x$ が第1の係数群の例であり、係数 $C1x$, $C2x$, $C3x$, $C4x$ が複数の第1の係数の例であり、係数 $C5x$ が他の第1の係数の例であり、式 $c2$ の関数 Gy が第2の関数の例であり、係数 $C1y$, $C2y$, $C3y$, $C4y$, $C5y$ が第2の係数群の例であり、係数 $C1y$, $C2y$, $C3y$, $C4y$ が複数の第2の係数の例であり、係数 $C5y$ が他の第2の係数の例であり、式 $c3$ の関数 Gz が第3の関数の例であり、係数 $C1z$, $C2z$, $C3z$, $C4z$, $C5z$ が第3の係数群の例であり、係数 $C1z$, $C2z$, $C3z$, $C4z$ が複数の第3の係数の例であり、係数 $C5z$ が他の第3の係数の例である。

10

【0132】

(11) 他の実施の形態

上記実施の形態では、触覚センサ 200 が4つのセンサ素子 201 , 202 , 203 , 204 を有するが、触覚センサ 200 が3つのセンサ素子を有してもよい。この場合には、3つのセンサ素子が互いに約 120 度の向きに配置されることが好ましい。

【0133】

さらに、センサ素子 201 , 202 , 203 , 204 のカンチレバー $CL1 \sim CL3$ の形状はU字形状に限らず、V字形状、W字形状、他の任意の形状に形成することができる。

20

【産業上の利用可能性】

【0134】

本発明は、圧力および剪断力を検出するため等に効果的に用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【0135】

【図1】本発明の一実施の形態に係る触覚センサシステムを製造するための触覚センサ製造システムの構成を示すブロック図である。

30

【図2】触覚センサを示す概略斜視図である。

【図3】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図4】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図5】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図6】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図7】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図8】触覚センサの製造方法の一例を示す工程図である。

【図9】カンチレバーに接続される出力回路の一例を示す回路図である。

【図10】図1の測定装置の構成の一例を示す模式図である。

【図11】関数の決定処理を示すフローチャートである。

40

【図12】出力変換部による出力変換処理を示すフローチャートである。

【図13】圧力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。

【図14】X軸方向の剪断力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。

【図15】Y軸方向の剪断力の印加値と各カンチレバーの出力値との関係を示す図である。

【図16】Z軸方向の圧力の印加値と検出値との関係を示す図である。

【図17】X軸方向の剪断力の印加値と検出値との関係を示す図である。

【図18】Y軸方向の剪断力の印加値と検出値との関係を示す図である。

【符号の説明】

50

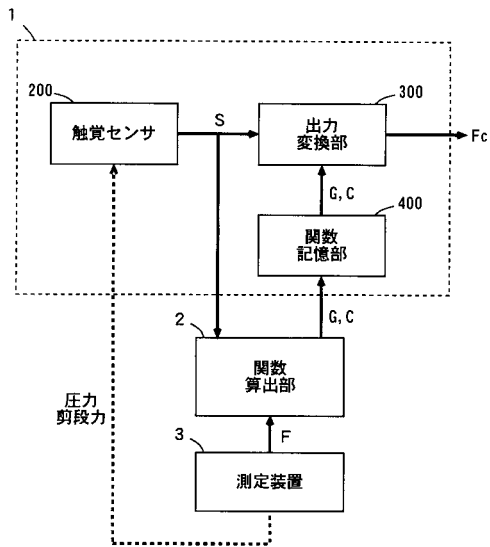
【 0 1 3 6 】

- 1 触覚センサユニット
- 2 関数算出部
- 3 測定装置
- 1 0 0 触覚センサ
- 1 0 1 結晶シリコン基板
- 1 0 2 埋め込み酸化膜
- 1 0 3 結晶シリコン膜
- 1 0 3 a ノンドープ層
- 1 0 3 b ドープ層
- 1 0 4 a , 1 0 4 b 電極
- 1 0 5 エラストマー層
- 2 0 0 触覚センサユニット
- 2 0 1 ~ 2 0 4 センサ素子
- 3 0 0 出力変換部
- 4 0 0 関数記憶部
- C L 1 ~ C L 4 カンチレバー
- S , S 1 ~ S 4 出力値
- G , G 1 ~ G 4 関数
- C , C 1 x ~ C 5 x , C 1 y ~ C 5 y , C 1 z ~ C 5 z 係数
- F , F x , F y , F z 印加値
- F c , F c x , F c y , F c z 検出値
- F ' 測定値

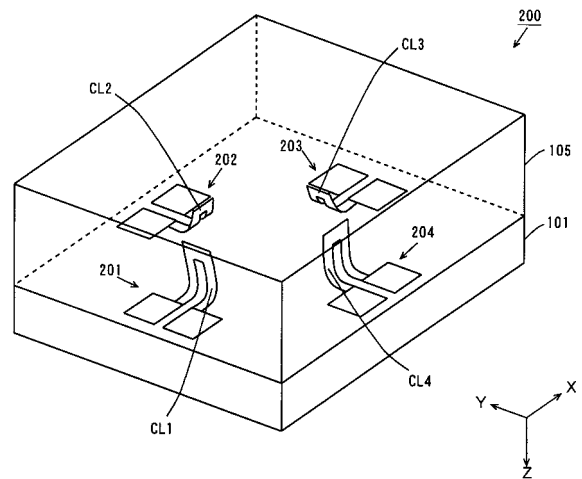
10

20

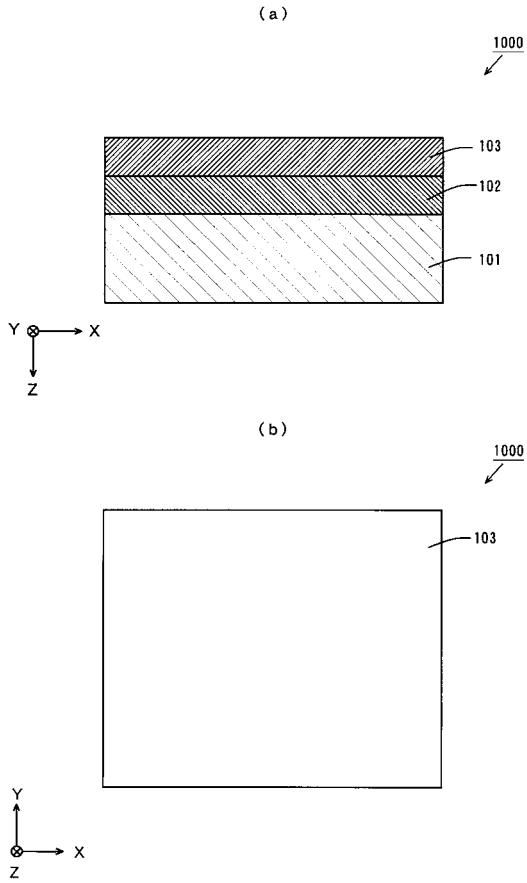
【 図 1 】



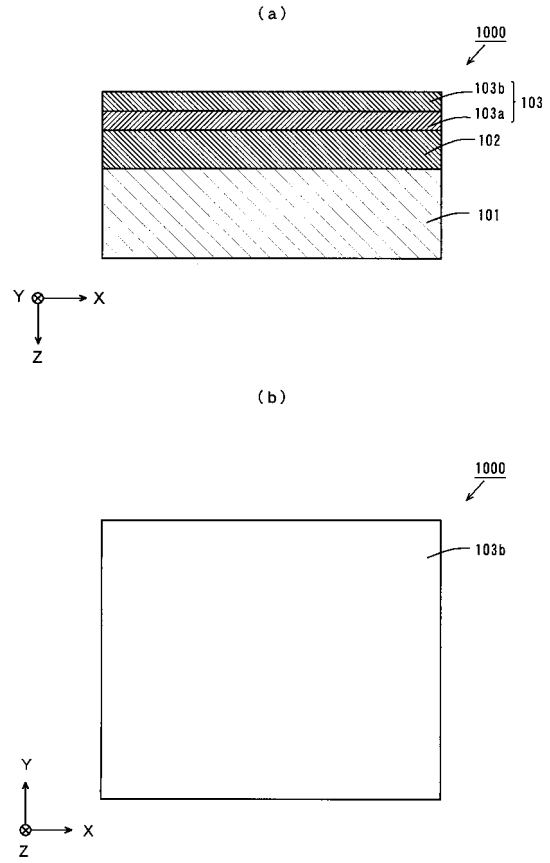
【 図 2 】



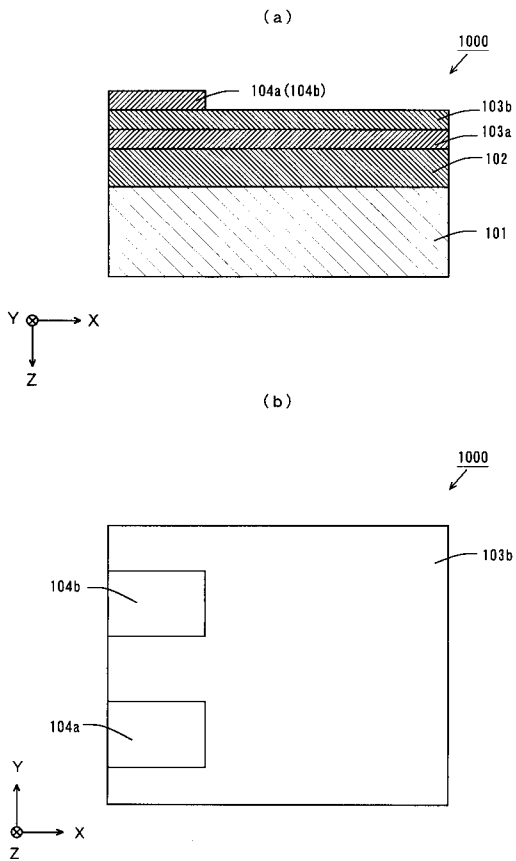
【 図 3 】



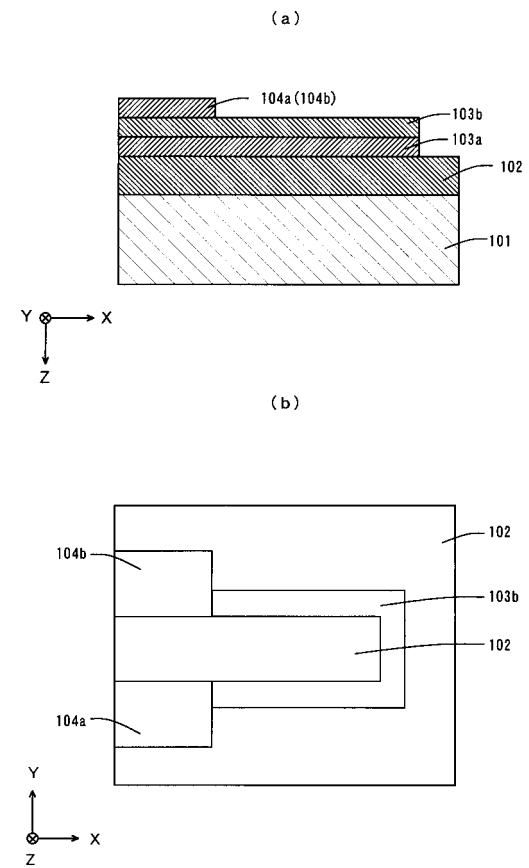
【 図 4 】



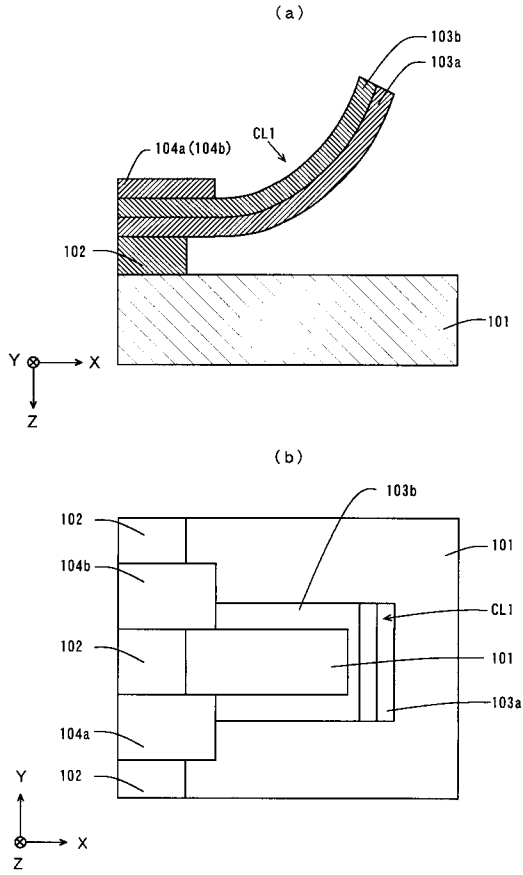
【 図 5 】



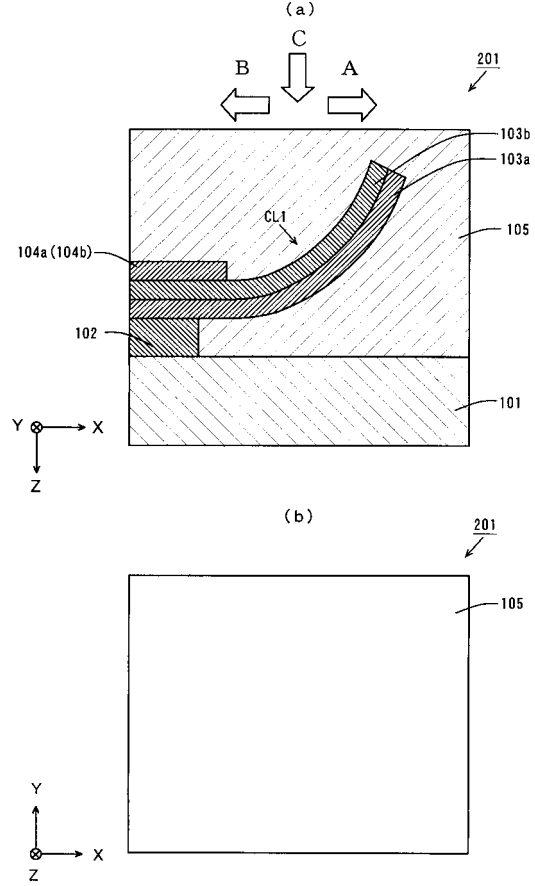
【 図 6 】



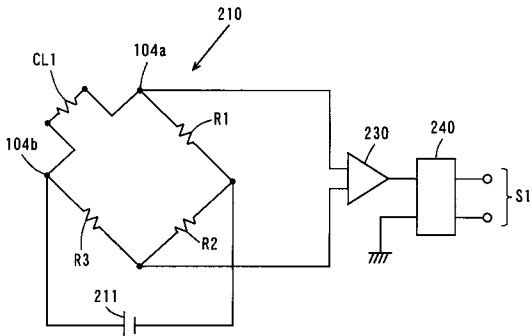
【図7】



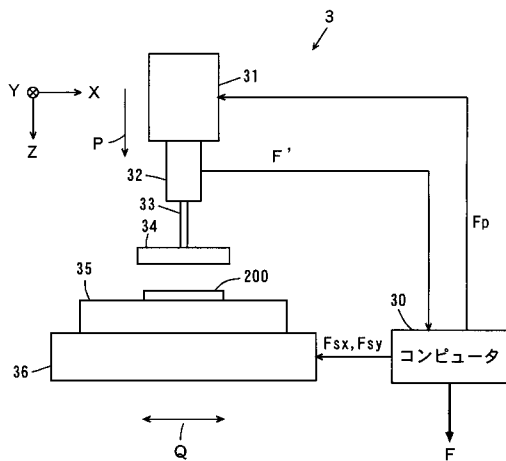
【図8】



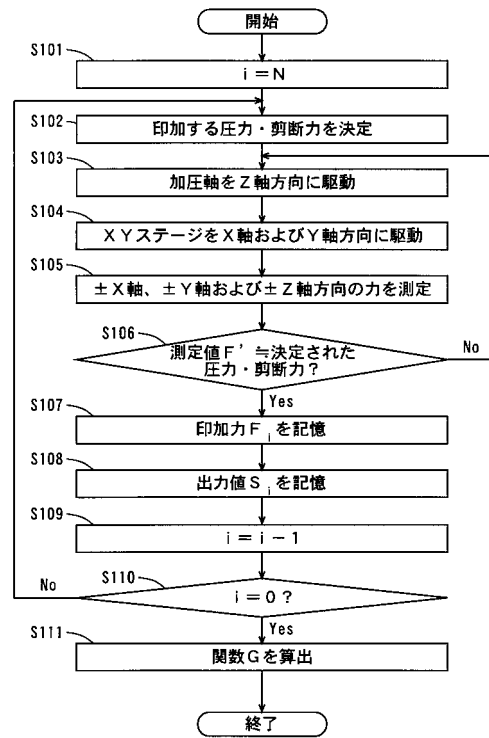
【図9】



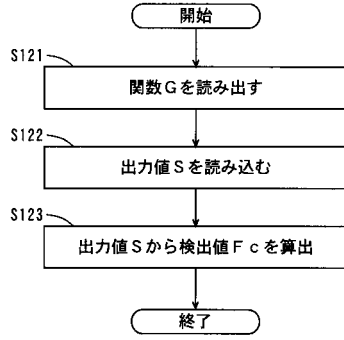
【図10】



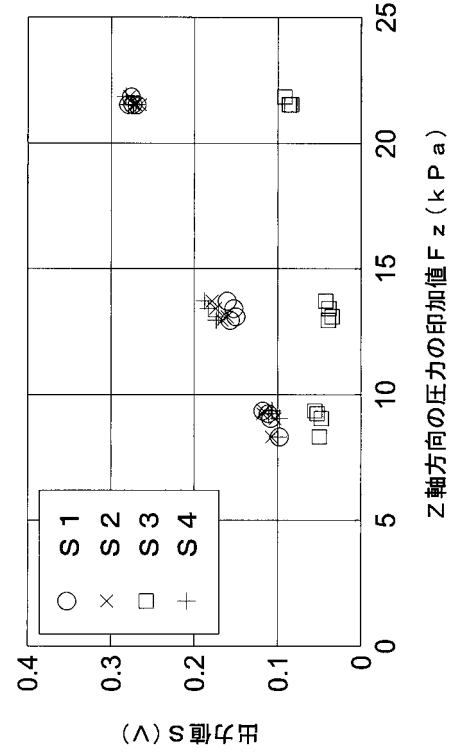
【図11】



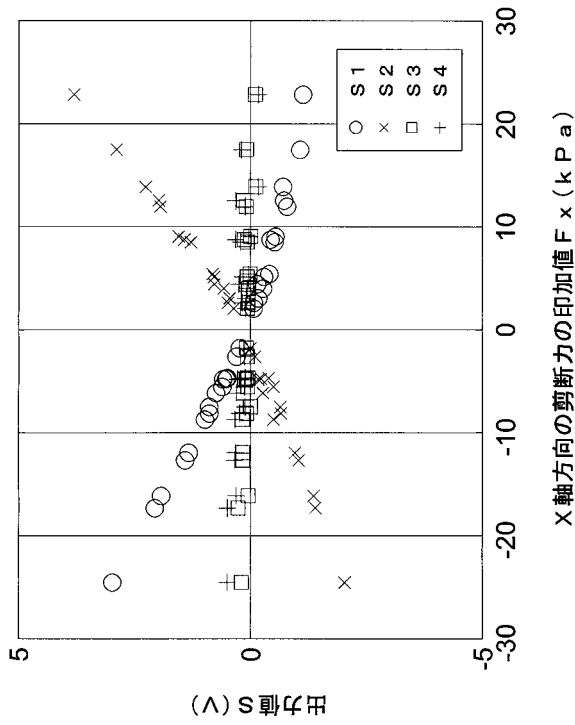
【図12】



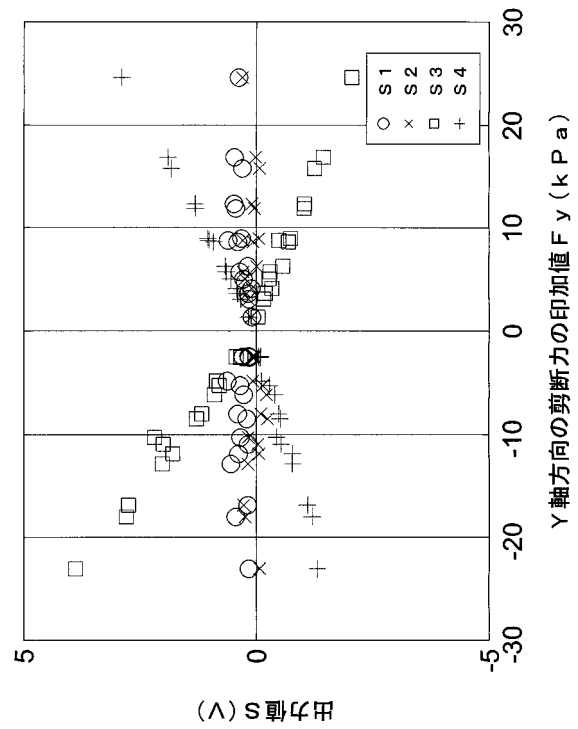
【図13】



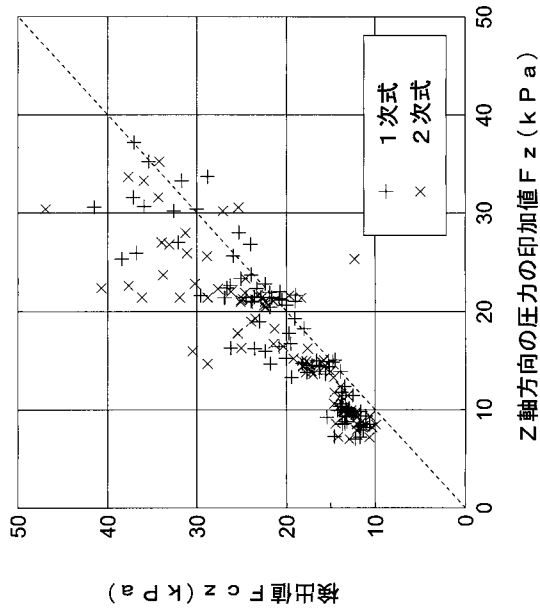
【図14】



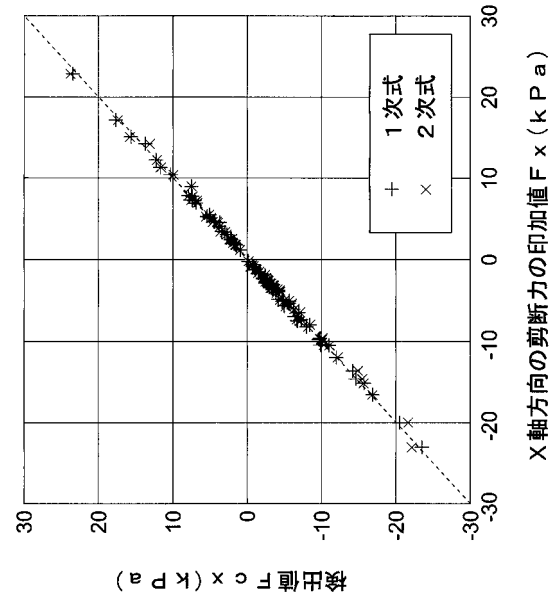
【図15】



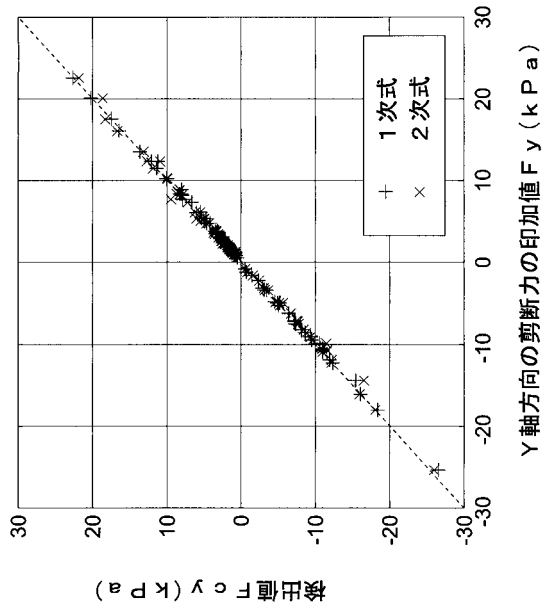
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

- (72)発明者 溝田 晃一
奈良県大和郡山市池沢町172 ニッタ株式会社内
- (72)発明者 樋口 克己
奈良県大和郡山市池沢町172 ニッタ株式会社内
- (72)発明者 金島 岳
大阪府豊中市待兼山町1-3 国立大学法人大阪大学内

審査官 公文代 康祐

- (56)参考文献 特開2006-201061(JP,A)
特開平11-237296(JP,A)
特開2006-208248(JP,A)
特開2006-126007(JP,A)
実開昭62-197035(JP,U)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01L 5/16
G01L 25/00
B25J 19/02